

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO COMPARATIVO DE ELEMENTOS FABRICADOS DE
HORMIGÓN CON MATERIAL RECICLADO PET (POLIETILENO
TEREFTALATO) Y DE HORMIGÓN CONVENCIONAL**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

EDGAR JONATHAN CHACÓN GUERRA

ejchg@yahoo.com

GLADYS ADRIANA LEMA CARRERA

adris_glc@hotmail.com

DIRECTOR: PROF. ING. GERMÁN LUNA H, MBA

german.luna@epn.edu.ec

Quito, Julio 2012

DECLARACIÓN

Nosotros, Edgar Jonathan Chacón Guerra, Gladys Adriana Lema Carrera, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

JONATHAN CHACÓN GUERRA

ADRIANA LEMA CARRERA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edgar Jonathan Chacón Guerra y Gladys Adriana Lema Carrera, bajo mi supervisión.

Ing. Germán Luna H.
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Gracias Dios por haber puesto en mi camino a todas las personas que de una u otra manera hicieron posible la realización de este proyecto, a quienes voy a agradecer y pedir que Dios los bendigas siempre.

A mi madre Leonor, por ser la mejor mamá del mundo, gracias por todo tu esfuerzo, tu apoyo y por la confianza que depositaste en mí. Gracias por estar siempre a mi lado y ser mi mejor amiga.

A mi padre Miguel Ángel, gracias por tus palabras, por tu ejemplo y tu apoyo incondicional. Gracias por ser mi padre.

A mis hermanos Ivonne, Miguel, Danita y Sebitas, por todas sus palabras de aliento, por todas las alegrías y esos hermosos momentos, son una bendición.

A Cristian, por su amor, por su paciencia, por su apoyo y ánimo que me brinda día a día para alcanzar nuevas metas.

A los miembros del tribunal Ing. Germán Luna, Ing. César Monroy y Ing. Félix Vaca, por la orientación, apoyo y ayuda brindada, para la realización de esta tesis, son un ejemplo a seguir. Al Ing. Patricio Placencia, ideador de nuestro proyecto.

A todos quienes forman parte del Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos de la Escuela Politécnica Nacional, Ing. Mercedes Villacis, Ing. Christian Gomez, Ing. Gustavo Martinez, Sr. Luis Tipas y Edwin Guaminga, por la ayuda brindada para la realización de todos los ensayos de laboratorio, gracias por su confianza y amistad.

A la Lic. Lida Tinitana rectora del Colegio “Fernando Ortiz Crespo” y todos los estudiantes y personal docente que participaron en las campañas de reciclaje, para proporcionarnos el material PET.

Adriana

AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud es principalmente con Dios por haberme dado la existencia y permitido culminar mi carrera.

A mis padres que creyeron en mí y me brindaron su apoyo incondicional durante todos los años de mi vida.

A mis hermanos quienes supieron darme palabras de aliento afianzando mi confianza.

A mis maestros por el conocimiento impartido que sentó las bases de una carrera.

A todo el personal que se encuentra en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos de la Escuela Politécnica Nacional que se involucraron e hicieron suya ésta tesis.

Jonathan

DEDICATORIA

Con todo mi amor y cariño:

En primer lugar a Dios y a la Virgen Santísima de “Las Lajas”, quienes tienen mi vida en sus manos y con sus bendiciones me han permitido culminar una etapa más en mi vida. A mis adorados padres Leonor y Miguel Ángel, quienes me han apoyado, guiado y cuidado incondicionalmente. A mis ñañitos queridos, Sebitas, Danita, Ivonne y Miguel, por estar a mi lado en los buenos y no tan buenos momentos, llenándome de alegrías. Y a una persona muy especial en mi vida, Cristian, por haber soportado todas mis locuras y malhumores durante todo este tiempo.

Adriana

DEDICATORIA

Con todo mi amor a Dios para que bendiga mi vida profesional y me guíe siempre con su infinita sabiduría.

A mi madre para que sienta que este logro es suyo antes que mío, la felicidad vendrá por diluvio y no tendremos donde guarecernos, madrecita no desespere que no está sola.

Hermanos y hermanita deseo que sientan orgullo de mí como yo lo hago por cada uno de ustedes.

Al amor de mi vida, Valeria, quiero compartir este logro y el resto de mis días contigo.

Jonathan

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIA	VI
DEDICATORIA	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	XIX
ÍNDICE DE ANEXOS	XXI
RESUMEN	XXIII
ABSTRACT	XXIV
PRESENTACIÓN	XXV
CAPÍTULO 1.	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	2
1.3. ALCANCE	3
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1. OBJETIVOS GENERALES.....	3
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO 2.	5
MARCO TEÓRICO	5

2.1.	ESTUDIOS SIMILARES.....	5
2.2.	CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL.....	9
2.3.	CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN PET.....	10
2.4.	MATERIALES, ENSAYOS Y NORMAS.....	10
2.4.1.	AGREGADOS.....	11
2.4.1.1.	GRANULOMETRÍA.....	12
2.4.1.1.1.	AGREGADO GRUESO.....	15
2.4.1.1.2.	AGREGADO FINO.....	16
2.4.1.2.	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN.....	18
2.4.1.2.1.	AGREGADO FINO.....	18
2.4.1.2.2.	AGREGADO GRUESO.....	21
2.4.1.3.	DENSIDADES APARENTES.....	23
2.4.1.4.	CONTENIDO DE HUMEDAD.....	25
2.4.1.5.	RESISTENCIA A LA ABRASIÓN.....	27
2.4.1.6.	CONTENIDO ORGÁNICO.....	29
2.4.2.	AGUA.....	31
2.4.3.	CEMENTO.....	32
2.4.3.1.	DENSIDAD REAL.....	33
2.4.3.2.	CONSISTENCIA NORMAL.....	35
2.4.3.3.	DENSIDADES APARENTES.....	37
2.4.3.4.	TIEMPOS DE FRAGUADO.....	38
2.4.4.	PET.....	40
2.4.4.1.	GENERALIDADES.....	40
2.4.4.2.	EFEKTOS PROVOCADOS POR EL USO DE PET.....	43
2.4.4.3.	RECICLAJE DEL PET.....	44
2.4.4.4.	CARACTERÍSTICAS DEL PET.....	49
2.4.5.	ACERO.....	50
CAPÍTULO 3.	51
DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL ESTUDIO.....		51
3.1.	DOSIFICACIÓN.....	51
3.1.1.	HORMIGÓN CONVENCIONAL.....	53
3.1.2.	HORMIGÓN CON VARIOS PORCENTAJES DE PET.....	54
3.1.3.	HORMIGÓN PET.....	58
3.2.	ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN PET.....	61
3.2.1.	PREPARACIÓN, ENCOFRADO, FUNDIDO Y CURADO.....	61

3.2.1.1.	PROBETAS.....	61
3.2.1.2.	VIGUETAS.....	62
3.2.2.	ENSAYOS EN HORMIGÓN FRESCO	62
3.2.2.1.	ASENTAMIENTO.....	62
3.2.2.2.	TEMPERATURA DEL HORMIGÓN	65
3.2.2.3.	CONTENIDO DE AIRE EN EL HORMIGÓN	66
3.2.3.	ENSAYOS EN HORMIGÓN ENDURECIDO (PROBETAS Y VIGAS)	71
3.2.3.1.	ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	71
3.2.3.1.1.	FORMA Y DIMENSIONES DE LA PROBETA UTILIZADA PARA EL ENSAYO.....	72
3.2.3.1.2.	CONDICIONES DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO.	73
3.2.3.1.3.	CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN	74
3.2.3.1.4.	CONDICIONES AMBIENTALES.....	75
3.2.3.1.5.	TIPOS DE FRACTURA.....	76
3.2.3.1.6.	MÓDULOS DE ELASTICIDAD.....	77
3.2.3.2.	ENSAYO A FLEXIÓN.	80
3.2.3.2.1.	MÓDULO DE ROTURA	82
3.2.3.3.	ENSAYO INDIRECTO DE TRACCIÓN (BRASILERO).	83
3.2.3.4.	ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN	86
3.2.3.5.	ENSAYO DE RESISTENCIA AL FUEGO	86
3.2.3.6.	ENSAYO DE ADHERENCIA.....	92
3.2.3.7.	ENSAYO DE VELOCIDAD SÓNICA.....	95
CAPÍTULO 4.	97
ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS.....		97
4.1.	PROPIEDADES FÍSICAS	97
4.1.1.	CONTENIDO DE AIRE.....	97
4.1.2.	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN	99
4.1.3.	TEMPERATURA.....	101
4.1.4.	TRABAJABILIDAD.....	102
4.2.	PROPIEDADES MECÁNICAS	104
4.2.1.	COMPRESIÓN	104
4.2.2.	TRACCIÓN INDIRECTA.....	107
4.2.3.	FLEXIÓN.	108
4.2.4.	MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	110
4.2.5.	RESISTENCIA AL FUEGO.....	112

4.2.6.	ADHERENCIA	113
4.2.7.	VELOCIDAD SÓNICA	115
4.3.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	116
4.3.1.	INVERSIÓN TOTAL O MONTO ORIGINAL DE LA INVERSIÓN. ...	117
4.3.2.	VIDA ÚTIL Y VALOR DE RESCATE	119
4.3.3.	TASA MÍNIMA REQUERIDA	120
4.4.	CUADROS COMPARATIVOS	122
CAPÍTULO 5.		123
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		123
5.1.	CONCLUSIONES.....	123
5.2.	RECOMENDACIONES	125
CAPÍTULO 6.		126
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		126
ANEXOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1.	ESFUERZO DE COMPRESIÓN - CONCRETO DE 30 MPA.....	6
FIGURA 2.2.	ESFUERZO DE COMPRESIÓN - CONCRETO DE 45 MPA.....	7
FIGURA 2.4.	ESFUERZO DE ROTURA DE MAMPUESTOS.....	8
FIGURA 2.5.	VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	9
FIGURA 2.6.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO.	16
FIGURA 2.7.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO.	17
FIGURA 2.8.	PRODUCCIÓN DIARIA DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL DMQ (TON/DÍA).	44
FIGURA 2.9.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL PET.....	49
FIGURA 3.1.	DIAGRAMA PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA DE UN CONCRETO NORMAL.....	52
FIGURA 3.2.	PORCENTAJE DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL, $F'C = 180 \text{ KG/CM}^2$	53
FIGURA 3.3.	PORCENTAJE DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL, $F'C = 210 \text{ KG/CM}^2$	54
FIGURA 3.4.	COMPONENTES DEL HORMIGÓN REEMPLAZANDO 10% DE PET.	55
FIGURA 3.5.	COMPONENTES DEL HORMIGÓN REEMPLAZANDO 25% DE PET.	56
FIGURA 3.6.	COMPONENTES DEL HORMIGÓN REEMPLAZANDO 50% DE PET.	56
FIGURA 3.7.	COMPONENTES DEL HORMIGÓN REEMPLAZANDO 75% DE PET.	57

FIGURA 3.8.	ESFUERZO DE COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON VARIOS PORCENTAJES DE PET.....	58
FIGURA 3.9.	PORCENTAJE DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN PET, F'C = 180 KG/CM ²	59
FIGURA 3.10.	PORCENTAJE DE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN PET, F'C = 210 KG/CM ²	60
FIGURA 3.11.	EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON LA RELACIÓN AGUA-CEMENTO.	74
FIGURA 3.12.	EVOLUCIÓN DE LAS RESISTENCIAS A COMPRESIÓN CON DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES.	75
FIGURA 3.13.	CURVA TÍPICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DEL HORMIGÓN	78
FIGURA 3.14.	ESQUEMA DE UN APARATO PARA EL ENSAYO A FLEXIÓN. .	81
FIGURA 3.15.	ENSAYO DE FLEXIÓN DEL HORMIGÓN.....	81
FIGURA 3.16.	ENSAYO DE TRACCIÓN.	84
FIGURA 3.17.	ENSAYO BRASILEIRO - DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS MUY PARECIDA A LA DE TRACCIÓN PURA.....	84
FIGURA 3.18.	TEMPERATURA DE ENSAYO.....	89
FIGURA 3.19.	ADHERENCIA EN ANCLAJE.	93
FIGURA 4.1.	CONTENIDO DE AIRE DE LOS HORMIGONES.	97
FIGURA 4.2.	COMPONENTES DE LAS MEZCLAS.	98
FIGURA 4.3.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO	99
FIGURA 4.4.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO SSS.	100
FIGURA 4.5.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN.	100
FIGURA 4.6.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE TEMPERATURA.....	101
FIGURA 4.7.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ASENTAMIENTO.	102

FIGURA 4.8.	ESFUERZOS DE COMPRESIÓN PARA HORMIGONES F'C= 180KG/CM ² .	104
FIGURA 4.9.	ESFUERZO DE COMPRESIÓN PARA HORMIGONES F'C= 210KG/CM ² .	105
FIGURA 4.10.	ESFUERZOS DE COMPRESIÓN PARA HORMIGONES PET. ...	106
FIGURA 4.11.	TRACCIÓN INDIRECTA DE LOS HORMIGONES.....	107
FIGURA 4.12.	MÓDULO DE ROTURA A LOS 28 DÍAS.	109
FIGURA 4.13.	ESFUERZO – DEFORMACIÓN, F'C = 180 KG/CM ²	111
FIGURA 4.14.	ESFUERZO – DEFORMACIÓN, F'C = 210 KG/CM ²	111
FIGURA 4.15.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DESPUÉS DEL FUEGO. ...	113
FIGURA 4.16.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE ADHERENCIA.	114
FIGURA 4.17.	RESULTADOS DE ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.	115

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1.	COMPONENTES DE LAS MEZCLAS	5
TABLA 2.2.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN.....	6
TABLA 2.3.	TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA ENSAYO DEL ÁRIDO GRUESO.	13
TABLA 2.4.	SERIE MÓDULO DE FINURA, DE DUFF ABRAMS.....	14
TABLA 2.5.	RESULTADOS Y REQUISITOS DE GRADACIÓN PARA AGREGADOS GRUESOS.	15
TABLA 2.6.	RESULTADOS Y REQUISITOS DE GRADACIÓN PARA AGREGADOS FINOS.	17
TABLA 2.7.	RESULTADOS PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO.	20
TABLA 2.8.	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA DE ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN.....	21
TABLA 2.9.	RESULTADOS PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.....	23
TABLA 2.10.	RESULTADOS DE DENSIDADES APARENTES DE LOS AGREGADOS.	25
TABLA 2.11.	RESULTADOS DE ABRASIÓN Y COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DEL AGREGADO GRUESO.....	28
TABLA 2.12.	RESULTADO DE CONTENIDO ORGÁNICO DE ARENA TRITURADA.	30
TABLA 2.13.	REQUISITOS PARA EL AGUA DE MEZCLADO.....	32
TABLA 2.14.	CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS, INEN 2380 – ASTM C 1157.	33

TABLA 2.15.	RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL CEMENTO..	40
TABLA 2.16.	CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SU USO.	41
TABLA 2.17.	SISTEMA DE CÓDIGOS DE LOS PRINCIPALES PLÁSTICOS...	43
TABLA 2.18.	RESULTADOS DE DENSIDADES APARENTES DEL PET.....	49
TABLA 2.19.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ACERO.	50
TABLA 3.1.	INFORMACIÓN REQUERIDA DE LOS COMPONENTES PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS.	51
TABLA 3.2.	DOSIFICACIÓN FINAL DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL, F'C = 180 KG/CM ²	53
TABLA 3.3.	DOSIFICACIÓN FINAL DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL, F'C = 210 KG/CM ²	54
TABLA 3.4.	DOSIFICACIÓN DE LOS HORMIGONES CON VARIOS PORCENTAJES DE PET.....	55
TABLA 3.5.	ESFUERZOS DE COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON VARIOS PORCENTAJES DE PET.	57
TABLA 3.6.	DOSIFICACIÓN FINAL DEL HORMIGÓN PET, F'C = 180 KG/CM ²	59
TABLA 3.7.	DOSIFICACIÓN FINAL DEL HORMIGÓN PET, F'C = 210 KG/CM ²	60
TABLA 3.8.	PROBETAS CILÍNDRICAS.....	61
TABLA 3.9.	VIGUETAS.....	62
TABLA 3.10.	ASENTAMIENTO RECOMENDADO PARA DIVERSOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN.....	63
TABLA 3.11.	RESULTADOS DE LOS ASENTAMIENTOS DE LOS HORMIGONES.	64

TABLA 3.12.	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL HORMIGÓN.....	65
TABLA 3.13.	TEMPERATURA DE LOS HORMIGONES FRESCOS.....	66
TABLA 3.14.	REQUISITOS APROXIMADOS DE AGUA DE MEZCLADO Y CONTENIDO DE AIRE PARA DIFERENTES ASENTAMIENTOS Y TAMAÑOS MÁXIMOS NOMINALES DE AGREGADO.....	67
TABLA 3.15.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE AIRE.....	70
TABLA 3.16.	FACTOR DE CORRECCIÓN SEGÚN LA RELACIÓN DE LONGITUD AL DIÁMETRO DEL ESPÉCIMEN.....	73
TABLA 3.17.	RELACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN A DIFERENTES EDADES.....	75
TABLA 3.18.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	76
TABLA 3.19.	MODELOS TÍPICOS DE FRACTURA EN EL HORMIGÓN.....	77
TABLA 3.20.	MÓDULOS DE ROTURA A LOS 28 DÍAS, EN KG/CM ²	83
TABLA 3.21.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA	85
TABLA 3.22.	RESULTADOS DE ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE LOS HORMIGONES.....	86
TABLA 3.23.	ACCIÓN DE LAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE EL HORMIGÓN.....	88
TABLA 3.24.	TEMPERATURA DE ENSAYO.....	89
TABLA 3.25.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN LUEGO DEL FUEGO.....	92
TABLA 3.26.	CÁLCULOS ENSAYOS DE ENSAYOS DE ADHERENCIA.....	94
TABLA 3.27.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ADHERENCIA.....	94
TABLA 3.28.	CALIDAD DE LOS HORMIGONES CON CEMENTOS PORTLAND.....	96
TABLA 3.29.	RESULTADOS ENSAYO DE VELOCIDAD SÓNICA.....	96
TABLA 4.1.	CLASIFICACIÓN DE LAS CONSISTENCIAS SEGÚN LOS ASENTAMIENTOS MEDIDOS CON EL CONO DE ABRAMS.....	103

TABLA 4.2.	PORCENTAJES DE LA RESISTENCIA DE COMPRESIÓN..	106
TABLA 4.3.	TRACCIÓN INDIRECTA DE LOS HORMIGONES.....	107
TABLA 4.4.	PORCENTAJES DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA A LOS 28 DÍAS.	108
TABLA 4.5.	PORCENTAJES DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DE LOS HORMIGONES.	109
TABLA 4.6.	RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON.	110
TABLA 4.7.	RESULTADOS DE ENSAYO DE FUEGO.....	112
TABLA 4.8.	ADHERENCIA DE LOS HORMIGONES.	114
TABLA 4.9.	VELOCIDAD SÓNICA DE LOS HORMIGONES.....	115
TABLA 4.10.	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS.	117
TABLA 4.11.	RESUMEN DE GASTOS.....	118
TABLA 4.12.	RESUMEN DE INGRESOS.....	119
TABLA 4.13.	RESUMEN DE FLUJO DE CAJA.....	119
TABLA 4.14.	PUNTO DE EQUILIBRIO.....	120
TABLA 4.15.	RESUMEN DE INVERSIÓN.	121
TABLA 4.16.	RESUMEN DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN PET Y HORMIGÓN CONVENCIONAL.....	122

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 2.1.	CANTERA DE GUAYLLABAMBA.	11
FOTOGRAFÍA 2.2.	TAMIZADORA MECÁNICA PARA AGREGADOS GRUESOS.	15
FOTOGRAFÍA 2.3.	TAMIZADORA MECÁNICA PARA AGREGADOS FINOS..	16
FOTOGRAFÍA 2.4.	ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN PARA ARENA.	20
FOTOGRAFÍA 2.5.	ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN PARA RIPIO.	22
FOTOGRAFÍA 2.6.	ENSAYO DE DENSIDADES APARENTES DE LOS AGREGADOS.	25
FOTOGRAFÍA 2.7.	MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.....	27
FOTOGRAFÍA 2.8.	ENSAYO DE CONTENIDO ORGÁNICO DE LA ARENA. ...	30
FOTOGRAFÍA 2.9.	MATERIAL Y EQUIPO PARA ENSAYO DE DENSIDAD REAL DEL CEMENTO.....	34
FOTOGRAFÍA 2.10.	ENSAYO DE CONSISTENCIA NORMAL.....	36
FOTOGRAFÍA 2.11.	ENSAYO DE DENSIDADES APARENTES.....	38
FOTOGRAFÍA 2.12.	ENSAYO DE TIEMPOS DE FRAGUADO.	39
FOTOGRAFÍA 2.13.	PET (POLIETILENO-TEREFTALATO).....	42
FOTOGRAFÍA 2.14.	CAPACITACIÓN ESTUDIANTIL.	45
FOTOGRAFÍA 2.15.	ENTREGA DE FUNDAS REUTILIZABLES Y BOLETINES....	46
FOTOGRAFÍA 2.16.	AYUDA COMUNITARIA PARA LA RECOLECCIÓN.....	46
FOTOGRAFÍA 2.17.	ALMACENAJE DURANTE EL DÍA DE CAMPAÑA.	47

FOTOGRAFÍA 2.18. MÁQUINA TRITURADORA DE PET.	47
FOTOGRAFÍA 2.19. TRITURACIÓN DEL PET.	48
FOTOGRAFÍA 2.20. USOS DEL MATERIAL RECICLADO PET.	48
FOTOGRAFÍA 3.2. ENSAYO DE ASENTAMIENTO DEL HORMIGÓN.	64
FOTOGRAFÍA 3.3. ENSAYO DE CONTENIDO DE AIRE.	68
FOTOGRAFÍA 3.4. ENSAYO DE COMPRESIÓN.	72
FOTOGRAFÍA 3.5. ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.	79
FOTOGRAFÍA 3.6. EXPOSICIÓN A PROPANO INCINERADO DE LAS PROBETAS.	90
FOTOGRAFÍA 3.7. CONTROL DE TEMPERATURA DURANTE EL ENSAYO.	90
FOTOGRAFÍA 3.8. ENSAYO DE COMPRESIÓN DE HORMIGÓN CONVENCIONAL SOMETIDO A FUEGO.	91
FOTOGRAFÍA 3.9. ENSAYO DE COMPRESIÓN DE HORMIGÓN PET SOMETIDO A FUEGO.	91
FOTOGRAFÍA 3.10. PROBETA PARA ENSAYO DE ADHERENCIA.	93
FOTOGRAFÍA 3.11. EQUIPO PARA ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.	95

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO Nº 1** ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO GRUESO
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 2** ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO ... **¡ERROR!**
MARCADOR NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 3** PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 4** DENSIDADES APARENTES DE AGREGADO FINO... **¡ERROR!**
MARCADOR NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 5** DENSIDADES APARENTES AGREGADO GRUESO.. **¡ERROR!**
MARCADOR NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 6** ABRASIÓN DEL AGREGADO GRUESO; **¡ERROR! MARCADOR**
NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 7** CONTENIDO ORGÁNICO DEL AGREGADO FINO..... **¡ERROR!**
MARCADOR NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 8** DENSIDAD REAL DEL CEMENTO; **¡ERROR! MARCADOR NO**
DEFINIDO.
- ANEXO Nº 9** CONSISTENCIA NORMAL DEL CEMENTO..... **¡ERROR!**
MARCADOR NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 10** DENSIDADES APARENTES DEL CEMENTO..... **¡ERROR!**
MARCADOR NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 11** TIEMPOS DE FRAGUADO DEL CEMENTO..... **¡ERROR!**
MARCADOR NO DEFINIDO.
- ANEXO Nº 12** GRANULOMETRÍA DEL PET; **¡ERROR! MARCADOR NO**
DEFINIDO.

ANEXO Nº 13 DENSIDADES APARENTES DEL PET; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 14 DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES CONVENCIONALES Y HORMIGÓN PET; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 15 ENSAYO DE COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y PET; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 16 ENSAYO DE FLEXIÓN (MÓDULO DE ROTURA) DE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y PET; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 17 ENSAYO BRASILEIRO O TRACCIÓN INDIRECTA DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL Y PET; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 18 ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL Y PET; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 19 ENSAYO DE COMPRESIÓN DESPUÉS DEL FUEGO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL Y PET; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 20 ENSAYO DE VELOCIDAD SÓNICA DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL Y PET; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 21 ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 22 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

ANEXO Nº 23 FLUJO DE CAJA; **¡ERROR!** **MARCADOR NO DEFINIDO.**

RESUMEN

La utilización de materiales reciclables en la construcción tiene como propósito resolver algunos de los problemas ocasionados en el manejo de residuos sólidos plásticos, en particular el polietileno tereftalato PET, el mismo que es empleado como agregado en el hormigón para este proyecto.

El presente estudio muestra el comportamiento del hormigón PET y hace un análisis comparativo con el hormigón convencional, tanto de propiedades físicas como contenido de aire, peso específico y absorción, temperatura y trabajabilidad; así como de las propiedades mecánicas como compresión, tracción indirecta, flexión, módulo de elasticidad, resistencia al fuego, adherencia y velocidad sónica, con el propósito de observar las ventajas y desventajas del uno frente al otro.

Para este fin, en la primera etapa se evaluaron las propiedades mecánicas y físicas de cada uno de los agregados, agua, cemento y PET, necesarias para el diseño de las mezclas de hormigón. La segunda etapa consistió en el diseño de las mezclas de hormigón convencional y hormigón PET con el porcentaje óptimo de PET y la fabricación de probetas para realizar los respectivos ensayos en hormigón endurecido. La tercera etapa se desarrolló el análisis comparativo de las propiedades físicas y mecánicas ya mencionadas; así como un análisis económico del proyecto.

Se espera que este estudio sirva de base para futuras investigaciones complementarias.

ABSTRACT

The use of recyclable materials in construction is intended to solve some of the problems in the management of solid waste plastics, particularly polyethylene terephthalate PET, the same that is used as aggregate in concrete for this project.

This study shows the behavior of concrete PET and a comparative analysis with conventional concrete, both physical properties such as air content, specific gravity and absorption, temperature, and workability as well as mechanical properties such as compression, indirect tensile, bending, modulus of elasticity, fire resistance, adhesion and sonic velocity in order to observe the advantages and disadvantages of one over the other.

To this end, in the first stage were evaluated mechanical and physical properties of each of the aggregates, water, cement and PET, necessary for the design of concrete mixtures. The second stage involved the design of conventional concrete mixtures and concrete PET with the optimal percentage of PET and construction of probes for the respective assays in hardened concrete. The third stage consisted of a comparative analysis of physical and mechanical properties mentioned above as well as an economic analysis of the project.

It is hoped that this study as a basis for future investigations.

PRESENTACIÓN

En el país es creciente la necesidad de desarrollar proyectos verdes, a fin de disminuir el problema de la contaminación ambiental generado por el mal manejo de los residuos sólidos, en este caso el manejo de material plástico hecho de polietileno tereftalato.

El presente proyecto de tesis incluye al polietileno tereftalato como agregado en el hormigón, denominado hormigón PET, para este fin se debe conocer las propiedades de este nuevo hormigón, así toda la etapa experimental se realiza en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales, de la Escuela Politécnica Nacional.

Este estudio está compuesto por 6 capítulos y anexos, como se indica a continuación:

Capítulo 1. Introducción.- Se presenta los antecedentes, importancia, justificación, alcance y objetivos de la investigación.

Capítulo 2. Marco Teórico.- Se presenta en síntesis estudios similares realizados con PET, se define las características de los agregados, como la arena, ripio, agua, cemento y PET.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental del Estudio.- Comprende el diseño de las mezclas de hormigón convencional y hormigón PET. Muestra las condiciones y procedimientos para los ensayos en hormigón fresco y en hormigón endurecido.

Capítulo 4. Análisis Comparativo de Resultados.- En esta fase del estudio se observan las posibles variaciones en las propiedades físicas y mecánicas.

Capítulo 5.- Conclusiones y Recomendaciones.- En este capítulo se analiza y sintetiza en comentarios a fin de establecer las ventajas o desventajas del hormigón PET con el hormigón convencional.

Capítulo 6.- Referencias Bibliográficas.- Se menciona los libros, normas, revistas y páginas web que sirvieron de referencia para el estudio.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En un planeta que ha sido modificado en los últimos 50 años mucho más que en toda la existencia de la humanidad, pretendiendo encontrar confort a costa de la destrucción de la naturaleza, el desarrollo de tecnologías limpias y la gestión integral de residuos sólidos es una necesidad urgente. El gran crecimiento de las urbes y el uso cada vez más frecuente de productos desechables, ha incrementado la producción de desechos domésticos e industriales, además de este inconveniente la problemática va más allá de la generación de residuos sólidos; una población constantemente creciente demanda de obra civil, lo que significa a su vez mayor cantidad de agregados para su ejecución, que son explotados en las márgenes de los ríos y de canteras, adicionando un elemento más al deterioro del ambiente. Como es lógico entender, se trata de una gran maraña de afectaciones que son difíciles de manejar y atacar, pero es deber del ingeniero civil tener soluciones oportunas y con conciencia social para corregir o reducir progresivamente lo anteriormente indicado.

Varias iniciativas para paliar la problemática se han desarrollado, así puede nombrar el caso del Colegio Fernando Ortiz Crespo, ubicada en la Provincia de Pichincha, Cantón Quito, Parroquia Zámbriza; quienes con el apoyo de otras instituciones educativas, estatales y la Embajada de Bélgica, dedican parte de su tiempo a concientizar y promover campañas de reciclaje y reutilización de residuos plásticos en la Parroquia de Zámbriza, esta institución recepta y tritura el material conseguido en sus campañas, el producto final se destina a distintos usos tales como la elaboración de pupitres y como agregado alternativo en bloques y adoquines para la construcción.

El estudio que aquí se presenta es una iniciativa más para la reutilización de residuos plásticos y una alternativa a la sustitución parcial de los agregados convencionales, encapsulando en elementos de hormigón a las botellas de

plástico que serían parte importante de los rellenos sanitarios contribuyendo a la contaminación ambiental de las periferias de las ciudades.

1.2. IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

La disposición de residuos sólidos de Quito donde cada día se generan alrededor de 1800 toneladas, está a cargo de EMASEO (Empresa Metropolitana de Aseo), y sin lugar a duda constituye un problema de difícil solución, parte de estos residuos son enterrados, lo cual no es una alternativa racional desde el punto de vista ambiental, ya que la mayor parte de estos residuos no son biodegradables o lo son a muy largo plazo.

El tiempo que demora el proceso de descomposición del PET, polietileno tereftalato, tarda más de 500 años en degradarse y este proceso tarda aún más si están enterradas.

Al ser el PET (polietileno tereftalato) un material inerte, se puede considerar como agregado en el hormigón, este material presenta partículas menores a la malla N°4(4,75mm), por ende se considera como agregado fino.

De aquí la importancia de la elaboración de este estudio, ya que el hormigón PET es una tecnología sustentable, ya que se utiliza como agregado del hormigón material reciclado plástico PET, promoviendo el uso racional de recursos disponibles en lugar de enterrarlos, quemarlos o acumularlos en basureros al aire libre; aplicando procedimientos para la fabricación que no son contaminantes para el medio ambiente.

El presente estudio expone y emplea los pasos y recomendaciones para el diseño de las dosificaciones del hormigón convencional y PET, de acuerdo a las normas vigentes en el Ecuador, INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), ASTM (American Society for Testing of Materials) y ACI (American Concrete Institute). Así como también muestra las características y propiedades del hormigón PET, además hace un análisis comparativo con el hormigón convencional, a fin de

conocer su comportamiento para el diseño de estructuras cuyos esfuerzos de compresión no sean superiores a $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

1.3. ALCANCE

La obra civil de menor importancia, tales como bordillos, aceras, replantillos, muebles fijos de cocina, aceras, tapas, etc., ejecutada en su mayoría por entidades públicas, necesita de cantidades considerables de hormigón, razón por la cual es prioridad en el presente estudio, encontrar un hormigón PET que reemplaza agregado fino con la mayor cantidad de material plástico reciclado; para que cumpla con la misma función que un hormigón convencional, encontrando la dosificación adecuada para lograr este propósito, también las propiedades físicas, mecánicas, ventajas y desventajas técnicas y económicas posibles de determinar en el nuevo material de construcción. Cabe mencionar que no es propósito de esta tesis, determinar el comportamiento del hormigón PET con otros materiales de construcción, tal como lo es el acero en el hormigón armado. Al ser de responsabilidad de los gobiernos locales el manejo de los residuos sólidos, será más conveniente para ellos hacer uso de ésta investigación en las obras civiles antes mencionadas.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVOS GENERALES

- Comparar el comportamiento mecánico y propiedades físicas de los elementos fabricados con hormigón convencional y con hormigón PET.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer una nueva alternativa de diseño y construcción en elementos sometidos a bajos esfuerzos, utilizando como un agregado adicional al material reciclado PET.

- Encontrar la dosificación adecuada para el hormigón con PET, con características similares a las del hormigón convencional, para resistencias de uso común 180 kg/cm^2 y 210 kg/cm^2 .
- Determinar y comparar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón elaborado con material PET.
- Comparar los costos de elaboración del hormigón convencional y hormigón con PET, así como el impacto ambiental provocado.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. ESTUDIOS SIMILARES

De los estudios más relevantes afines al tema de la presente investigación, se puede nombrar el estudio realizado por la Universidad Comunitaria Regional de Chapecó¹, Facultad de Ingeniería Civil, ubicada en el estado de Santa Catarina en Brasil; en el cual se hace referencia a diseños de concretos de 30 MPa y 45 MPa, reemplazando polietileno de tereftalato (PET) al diseño de la mezcla patrón, observando una disminución en la resistencia a la compresión al aumentar el porcentaje de PET adicionado, como muestran las siguientes tablas.

Tabla 2.1. Componentes de las Mezclas

	Concreto 30 MPa 1:1.47:2.28:0.43				Concreto 45 MPa 1:0.79:1.65:0.38			
	<i>Patrón</i>	<i>15%</i>	<i>30%</i>	<i>45%</i>	<i>Patrón</i>	<i>15%</i>	<i>30%</i>	<i>45%</i>
Cemento	5.893	5.893	5.893	5.893	11.436	11.436	11.436	11.436
Arena	10.050	8.542	7.075	5.527	8.984	8.984	8.984	8.984
Piedra	14.716	14.716	14.716	14.716	18.766	18.766	18.766	18.766
Agua	2.537	2.537	2.537	2.537	4.472	4.472	4.472	4.472
Pet	0	1.507	3.015	4.522	0	1.347	2.695	4.040
Volumen de concreto para 8 moldes cilíndricos de 10cm x 20cm.								

Fuente: Pietrobelli, E. R. (2010). Estudo de viabilidade do pet reciclado em concreto sob aspecto da resistência a compressão.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

¹ Pietrobelli, E. R. (2010). Estudo de viabilidade do pet reciclado em concreto sob aspecto da resistência a compressão. Chapecó: Universidade Comunitária da Região de Chapecó.

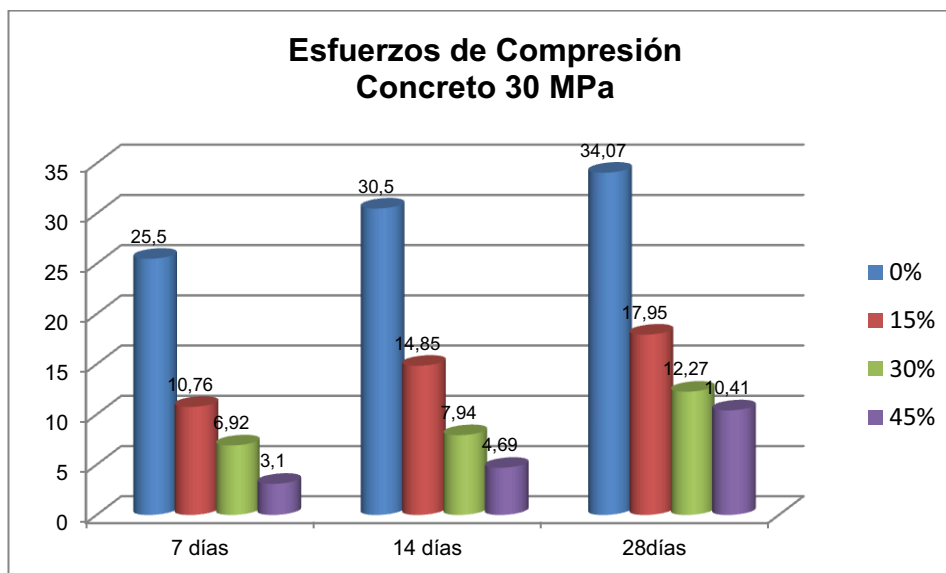
Tabla 2.2. Resultados de los Ensayos de Compresión

		Resistencia MPa.		
		7 días	14 días	28 días
Concreto 30 MPa 1:1.47:2.28:0.43	0%	25.50	30.50	34.07
	15%	10.76	14.85	17.95
	30%	6.92	7.94	12.27
	45%	3.10	4.69	10.41
		7 días	14 días	28 días
Concreto 45 MPa 1:0.79:1.65:0.38	0%	38.28	40.33	47.21
	15%	20.98	25.91	27.55
	30%	17.31	20.09	24.36
	45%	9.86	14.04	15.88

Fuente: Pietrobelli, E. R. (2010). Estudo de viabilidade do pet reciclado em concreto sob aspecto da resistência a compressão.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

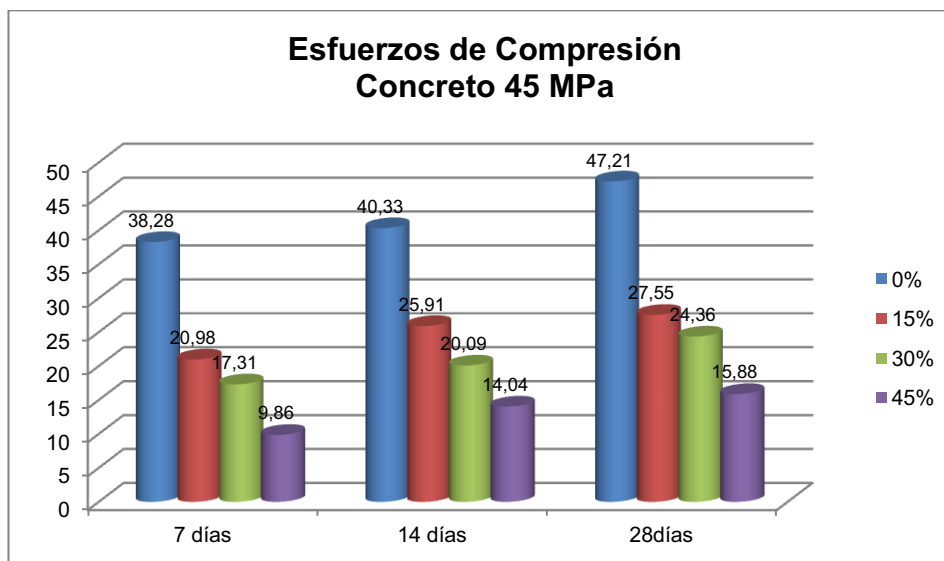
Figura 2.1. Esfuerzo de compresión - Concreto de 30 MPa



Fuente: Pietrobelli, E. R. (2010). Estudo de viabilidade do pet reciclado em concreto sob aspecto da resistência a compressão.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 2.2. Esfuerzo de compresión - Concreto de 45 MPa



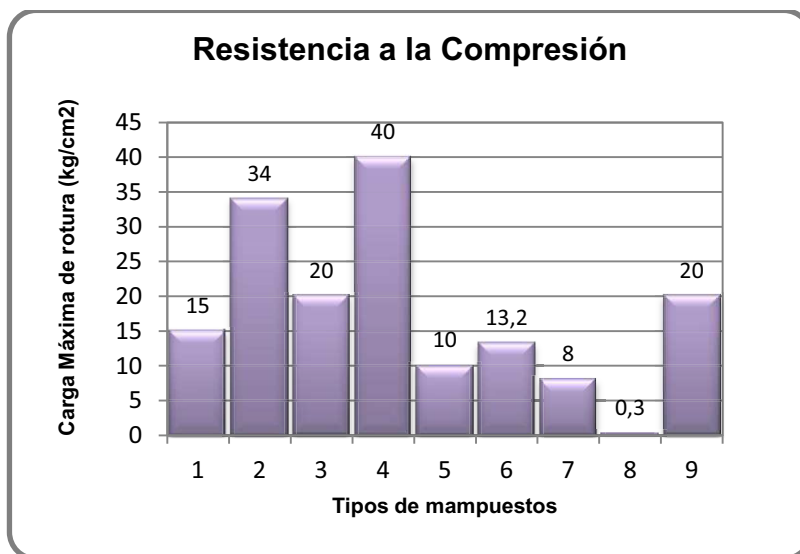
Fuente: Pietrobelli, E. R. (2010). Estudo de viabilidade do pet reciclado em concreto sob aspecto da resistência a compressão.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

El Instituto de Investigación del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la República de Argentina-CONICET, Centro Experimental de la Vivienda Económica-CEVE, hace uso de botellas de polietileno de tereftalato trituradas(PET), bolsas de polietileno de baja densidad(LDPE) y tazas desechables para bebidas, materiales de empaque y bandejas de carne de poliestireno(PS) para la fabricación de mampostería de bloques y ladrillos, los cuales fueron ensayados en la Universidad de Córdoba y en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial(INTI), observándose resistencias de compresión menores a las habituales, pero suficientes para estructuras que no soportan grandes esfuerzos.²

² Gaggino, R. (2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la construcción. Revista INVI, 23 (063), 137-163.

Figura 2.4. Esfuerzo de rotura de mampuestos



1. Ladrillos y bloques cerámicos no portantes.
2. Ladrillos y bloques cerámicos portantes.
3. Bloques de hormigón no portantes.
4. Bloques de hormigón portantes.
5. Bloques con PET reciclado.
6. Ladrillos con LDPE reciclado.
7. Ladrillos con plásticos varios reciclados.
8. Ladrillos con PS reciclado.
9. Ladrillos con PET reciclado.

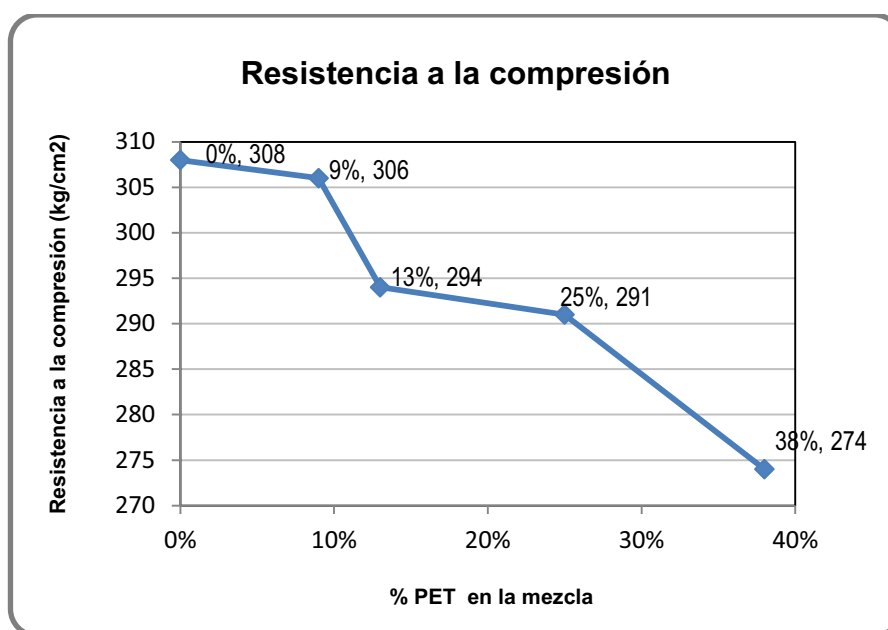
Fuente: Gaggino, R. (2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la construcción. Revista INVI, 23 (063), 137-163.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Estudios similares a la fabricación de mampostería y adoquines con PET se han desarrollado en el país, en la Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería

Civil y Ambiental, como el realizado en la tesis Cañizares-Moreno³, del cual se extrae la Figura 2.5.

Figura 2.5. Variación de la resistencia a la compresión



Fuente: Cañizares, F., & Moreno, R. (2011). Agregado alternativo para fabricación de bloques y adoquines en base a polítilen tereftalato

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL

El hormigón es un material pétreo artificial, no homogéneo, constituido por la mezcla apropiada de cemento, áridos finos (arena), áridos gruesos (ripió) y agua, con la eventual incorporación de aditivos.

El cemento es el material aglomerante que tiene las propiedades de adherencia y cohesión requerida para unir los componentes entre sí; los áridos llamados también agregados son de origen pétreo empleados como relleno; el agua es el

³ Cañizares, F., & Moreno, R. (2011). Agregado alternativo para fabricación de bloques y adoquines en base a polítilen tereftalato. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

elemento catalizador que reacciona con el cemento y hace que éste desarrolle sus propiedades ligantes formando así la mezcla denominada pasta.

Cuando se adiciona arena a la pasta de cemento, ésta toma el nombre de mortero, si al mortero se le añade ripio se consigue hormigón.

El hormigón convencional debe cumplir con los requisitos de trabajabilidad, consistencia, resistencia, durabilidad y economía. Estas características no son independientes entre sí, están estrecha y mutuamente ligadas, dependiendo fundamentalmente de la relación agua-cemento, de la calidad de los agregados, de sus proporciones y de la forma como se efectúa su preparación, colocación y curado.

Para el presente estudio se considera que el hormigón convencional será utilizado en obras civiles menores, tales como bordillos, aceras, replantillos, muebles fijos de cocina, aceras, tapas, etc.; es decir en elementos que no requieran esfuerzos de compresión mayores a $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, ni tienen responsabilidad estructural que afecte.

2.3. CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN PET

El hormigón PET es un material con los mismos componentes del hormigón convencional (cemento, agregados, agua), difiere de éste al sustituir parte del agregado fino por polietileno de tereftalato (PET).

El estudio de las características básicas del hormigón PET es el objetivo de este trabajo y se presentarán conforme al desarrollo de la investigación.

2.4. MATERIALES, ENSAYOS Y NORMAS

La propiedad mecánica más preponderante del hormigón es su resistencia a la compresión, $f'c$, la cual depende de muchos factores como la calidad y proporción

de sus materiales, la edad, la forma de elaboración y manejo del hormigón fresco y su curado.

Los principales factores que influyen en la resistencia se describen a continuación.

2.4.1. AGREGADOS

Los agregados o áridos ocupan aproximadamente las tres cuartas partes del volumen del hormigón, su uso tiene la finalidad de disminuir costos, brindar resistencia a la aplicación de carga y a la abrasión, además contrarrestar la filtración de humedades y la acción de otros agentes externos. [68]

En el desarrollo de este proyecto se usan los agregados que provienen de la trituración de rocas metamórficas de la cantera del río Guayllabamba, ubicada en la Provincia de Pichincha, Cantón Quito, Parroquia Guayllabamba, vía Quito-Guayllabamba, km 19 al costado derecho.

Fotografía 2.1. Cantera de Guayllabamba



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Existen dos tipos de agregados:

- Agregado grueso (piedra natural triturada).
- Agregado fino (arena fabricada).

A fin de aprovechar los materiales disponibles y basándose en las normas vigentes INEN y ASTM, se determinan las características de los agregados tales como: granulometría, peso específico y absorción, densidades aparentes, contenido de humedad, desgaste a la abrasión y contenido orgánico. Estas características deben cumplir los requerimientos de la norma INEN 872 “Áridos para hormigón. Requisitos”[63], o ASTM C 33 “Standard Specification for Concrete Aggregates”. [17].

2.4.1.1. Granulometría

Para separar los tipos de agregados se emplea el tamiz de abertura cuadrada N° 4 (4.75 mm), cualquier agregado que pase esta malla se considera agregado fino y la porción retenida es el agregado grueso.

Económicamente es recomendable emplear el mayor tamaño de agregado permitido, para reducir la cantidad de pasta utilizada.

La distribución granulométrica en agregados de acuerdo a la norma INEN 696 “Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso” [56] – ASTM C 136 “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates” [7], consiste en secar la muestra a una temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. El proceso de obtención de muestras se realiza de acuerdo a la norma INEN 695 “Áridos. Muestreo” [55] – ASTM D 75 “Standard Practice for Sampling Aggregates” [26] y mezclar completamente la muestra a ensayar, el tamaño de la muestra para el ensayo debe ser como mínimo 300g para agregado fino y para el agregado grueso se debe cumplir con lo señalado en la Tabla 2.3.

Empleando la norma INEN 872 “Áridos para hormigón. Requisitos.” [63] – ASTM C 33 “Standard Specification for Concrete Aggregates.” [17], se procede a adoptar

la serie de tamices necesarios y adecuados que cubran los tamaños de las partículas del material a ensayarse, estandarizados por la norma INEN 154 “Tamices de ensayo. Dimensiones nominales de las aberturas” [45] – ASTM E 11 “Standard Specification for Wire-cloth sieves for testing purposes” [28]. Ordenar los tamices en forma decreciente. Colocar la muestra y agitar los tamices manualmente o por medio de aparatos mecánicos durante un período suficiente de tal forma que, después de la finalización, no más del 1% en peso del material retenido en cualquier tamiz individual pase la abertura durante 1 min de tamizado manual. Se debe evitar una sobrecarga de material sobre un tamiz individual. Determinar los pesos de cada incremento de tamaño en una balanza, el peso total del material después del tamizado no deben diferir en más del 0.3%, respecto al peso de la muestra seca original.

Tabla 2.3. Tamaño de la muestra para ensayo del árido grueso

Tamaño nominal máximo, Aberturas cuadradas, en mm (pulgadas).	Tamaño de la muestra del ensayo Mínimo (kg).
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50,0	20
63,0	35
75,0	60
90,0	100
100,0	150
125,0	300

Fuente: INEN. (2011). NTE INEN 696. Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.

El cálculo del porcentaje de árido retenido en cada tamiz, en base al peso total de la muestra de ensayo, se calcula:

$$P = \frac{B}{A} \times 100 \quad (2-1)$$

Donde:

P = Porcentaje parcial del árido retenido en un determinado tamiz.

A = Peso de la muestra de ensayo.

B = Peso de la cantidad de material parcial retenido en un determinado tamiz.

El valor característico para determinar o tener una idea del grosor o finura del agregado o Módulo de Finura (MF), se obtiene al dividir entre 100 la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la siguiente serie:

Tabla 2.4. Serie Módulo de Finura, de Duff Abrams

Serie Módulo de Finura											
Tamiz N°	6"	3"	1 1/2"	3/4"	3/8"	4	8	16	30	50	100
Abertura (mm)	150.00	75.00	37.50	19.00	9.50	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15

Fuente: Monroy, C., Luna, G., & López, V. (1985). Cementos y hormigones. Instructivo de Laboratorio.

$$MF = \frac{\sum \% \text{ retenidos acumulados de tamices módulo de finura}}{100} \quad (2-2)$$

Este procedimiento es similar para agregado grueso y fino.

2.4.1.1.1. Agregado grueso

Para este estudio se ha tomado como el tamaño máximo del agregado grueso el de 1 1/4" (31.25 mm), que corresponde a 1/5 de la menor dimensión de los elementos a ensayarse y además cumple con requisitos de economía, por consiguiente la malla del tamaño máximo nominal es 1 1/2" (37.5 mm). [1]

Fotografía 2.2. Tamizadora mecánica para agregados gruesos



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

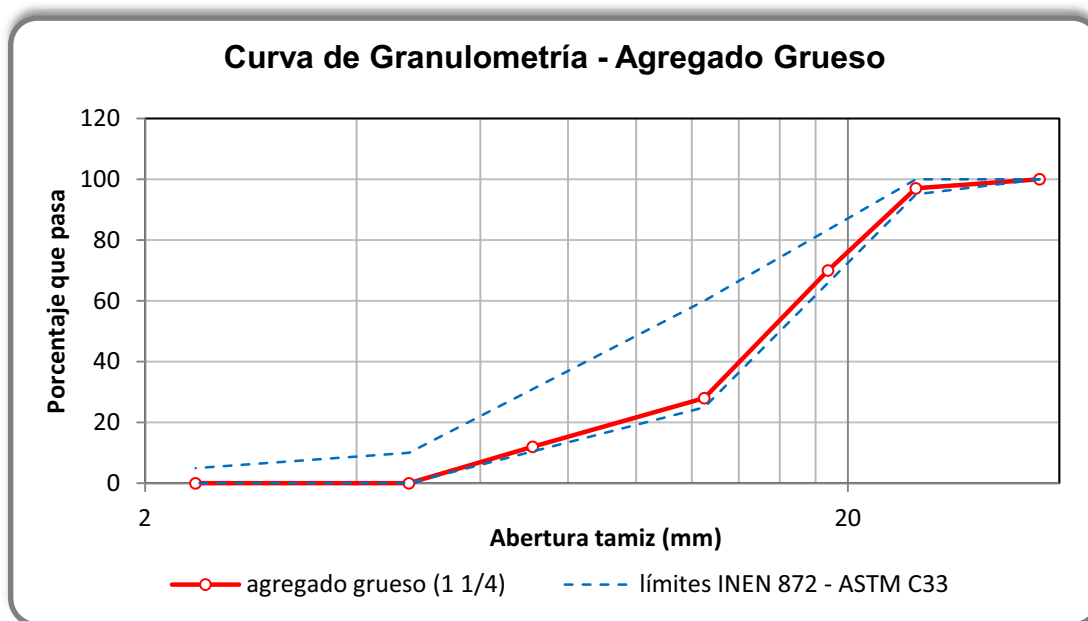
En el Anexo 1, se encuentran los cálculos correspondientes a la granulometría del agregado grueso, son el resultado del promedio de tres muestras y estos resultados se presentan en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5. Resultados y requisitos de gradación para agregados gruesos

Tamiz	Abertura (mm)	% pasa		
		1 1/4"	INEN 872 - ASTM C33	
			min	máx
1 1/2"	37.5	100	100	100
1"	25	97	95	100
1/2"	12.5	28	25	60
N# 4	4.75	0	0	10
N# 8	2.36	0	0	5
			MF	7.18

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 2.6. Análisis granulométrico del agregado grueso



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

2.4.1.1.2. *Agregado fino*

Los resultados obtenidos del ensayo de granulometría se presentan en la Tabla 2.6 y son un promedio de tres muestras:

Fotografía 2.3. Tamizadora mecánica para agregados finos



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

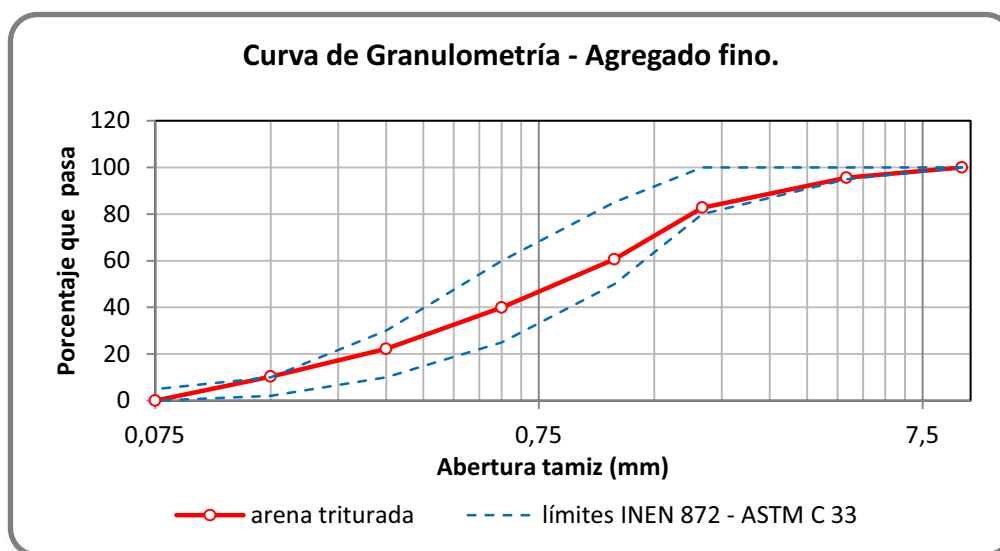
Tabla 2.6. Resultados y requisitos de gradación para agregados finos

Tamiz	Abertura (mm)	% pasa		
		1 1/4"	INEN 872 - ASTM C33	
			Mín.	Máx.
3/8 "	9,500	100	100	100
N4	4,750	96	95	100
N°8	2,360	83	80	100
N16	1,180	61	50	85
N 30	0,600	40	25	60
N°50	0,300	22	10	30
N°100	0,150	10	2	10
N°200	0,075	0	0	5
			MF	2.89

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

El agregado fino no debe tener más del 45% pasante en cualquier tamiz y retenido en el siguiente consecutivo de aquellos indicados y su Módulo de Finura no debe ser menor que 2,3 ni mayor que 3,1.⁴

Figura 2.7. Análisis granulométrico del agregado fino



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

⁴ INEN. (2011). *NTE INEN 872. Áridos para hormigón. Requisitos*. (Primera ed.). Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

2.4.1.2. Peso específico y absorción

Gravedad específica o densidad relativa es un valor adimensional, se obtiene de la relación entre la densidad del agregado y la densidad del agua.

Densidad (SSS) o densidad del material en la condición de “superficie saturada seca”, es la relación entre la masa total del agregado y su volumen total completamente saturado, sin considerar los vacíos entre partículas.

Absorción, se define así al incremento de la masa del agregado a consecuencia de la penetración de agua en los poros de las partículas, sin considerar el agua de la superficie externa de las partículas y se expresa como un porcentaje de la masa seca. La absorción es un parámetro importante, ya que los poros afectan la resistencia del agregado y están en relación con la absorción de agua, afectando la durabilidad del hormigón por alteración de la relación a/c.

Estas propiedades de los agregados permiten determinar la cantidad del material pétreo a usarse, así como la corrección en la cantidad de agua por absorción en el diseño del hormigón.

El peso específico se determina luego de secar los agregados. La densidad SSS y la absorción se determinan luego de saturar los agregados en agua durante un periodo definido.

2.4.1.2.1. Agregado fino

Cumpliendo con las disposiciones y procedimientos de la norma INEN 856 “Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.” [58] – ASTM C 128 “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate” [5], las cuales indican, sumergir en agua por $24h \pm 4h$ una muestra de árido fino, con el propósito de llenar con agua sus poros. Se retira la muestra del agua, se seca el agua superficial de las partículas hasta alcanzar la condición saturada superficialmente seca.

Para determinar la humedad superficial se debe colocar en el molde cónico en forma suelta el árido fino, compactar el árido con 25 golpes ligeros del compactador, levantar el molde y repetir el proceso hasta que el árido se desmorone ligeramente por la eliminación de las fuerzas cohesivas de la tensión superficial del agua.

Luego, se debe colocar $500\text{g} \pm 10\text{g}$ de esta muestra en un picnómetro, completar con agua hasta el 90% de su capacidad. Agitar el picnómetro manual o mecánicamente para extraer el aire. Ajustar la temperatura a $23,0^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Determinar la masa del picnómetro, muestra y agua hasta la marca de aforo; finalmente, la muestra se seca al horno y se determina nuevamente su masa.

Calcular los valores con las siguientes fórmulas:

$$\text{Peso específico} = \frac{A}{B + S - C} \quad (2-3)$$

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{S}{B + S - C} \quad (2-4)$$

$$\text{Absorción de agua} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad (2-6)$$

Donde:

A = Peso de la muestra seca en aire

B = Peso del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de aforo

S = Peso de muestra saturada superficialmente seca

C = Peso del picnómetro con agua y muestra hasta la marca de aforo

Fotografía 2.4. Ensayo de peso específico y absorción para arena



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

El resultado obtenido se muestra a continuación, es el promedio de tres muestras de peso específico, peso específico S.S.S., peso específico aparente y absorción, cuyos cálculos se observan en el Anexo 3.

Tabla 2.7. Resultados peso específico y absorción del agregado fino

	Unidad	1	2	3	Promedio
Peso Específico	gr/cm ³	2,467	2,464	2,459	2,463
Peso Específico S.S.S	gr/cm ³	2,556	2,554	2,551	2,553
Peso Específico Aparente	gr/cm ³	2,707	2,707	2,707	2,707
Absorción De Agua	%	3,60	3,66	3,72	3,66

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

2.4.1.2.2. *Agregado grueso*

Los requerimientos y procedimientos para obtener las características del agregado grueso se obtiene de la norma INEN 857 “Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso” [59] - ASTM C 127 “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate” [4].

La masa mínima de la muestra de ensayo se presenta en la Tabla 2.8 siguiente. El procedimiento indica, sumergir esta muestra de ensayo durante $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$, retirar la muestra del agua y colocarla sobre un paño absorbente, frotarla hasta que sea eliminada toda lámina visible de agua.

Determinar la masa en aire, inmediatamente colocar la muestra en la canastilla y determinar el peso de la canastilla y la muestra sumergida. Secar la muestra en el horno y determinar su masa.

Tabla 2.8. Masa mínima de la muestra de ensayo de peso específico y absorción

Tamaño máximo nominal, (mm)	Masa mínima de la muestra para ensayo, (kg)
12,5 o menor	2
19,0	3
25,0	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
125	75

Fuente: INEN. (2010). NTE INEN 857. Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.

Fotografía 2.5. Ensayo de peso específico y absorción para ripio



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Las fórmulas para el cálculo se muestran a continuación:

$$\text{Peso específico} = \frac{A}{B - C} \quad (2-6)$$

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{B}{B - C} \quad (2-7)$$

$$\text{Absorción de agua} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (2-8)$$

Donde:

A = Peso de la muestra seca

B = Peso de la muestra saturada superficialmente seca

C = Peso aparente en agua de la muestra saturada

Los resultados de peso específico, peso específico S.S.S., peso específico aparente y absorción, que se muestran a continuación es un promedio de tres muestras como se puede observar en el Anexo 4.

Tabla 2.9. Resultados peso específico y absorción del agregado grueso

	1	2	3	Promedio	
Peso Especifico	2,563	2,441	2,443	2,48	gr/cm ³
Peso Especifico S.S.S	2,640	2,515	2,516	2,55	gr/cm ³
Peso Especifico Aparente	2,777	2,635	2,636	2,68	gr/cm ³
Absorción De Agua	3,01	3,01	3,01	3,01	%

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

2.4.1.3. Densidades aparentes

Se llama densidad aparente o masa unitaria (peso volumétrico) del agregado, al peso del agregado necesario para ocupar un volumen unitario especificado, dicho volumen es el ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas de los agregados.

El peso de un determinado volumen de material varía de acuerdo a su compactación, por lo cual es necesario conocer los valores de densidad suelta y compactada, los mismos que son utilizados, por varios métodos para la selección de las dosificaciones de las mezclas de hormigón.

Los procedimientos y requisitos para determinar las densidades aparentes sueltas y compactadas están especificados en la norma INEN 858 “Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos.” [60] – ASTM C 29 “Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Wight") and Voids in Aggregate.” [14]. El tamaño de la muestra debe ser de aproximadamente el 125% a 200% respecto de la cantidad necesaria para llenar el molde y se debe secar la muestra hasta obtener masa constante, en un horno a 110°C ± 5°C.

Para la densidad aparente compactada, llenar la tercera parte del molde y nivelar la superficie con los dedos. Compactar la capa con 25 golpes de la varilla de compactación distribuidos uniformemente, repetir la compactación en los dos tercios y en el rebose del molde. En el caso de la densidad aparente suelta, llenar el molde a rebosar por medio de una pala, descargar el árido desde una altura no superior a 50 mm por encima de la parte superior del molde, evitando la segregación de las partículas.

Nivelar con la paleta y determinar el peso del molde y el peso del molde con su contenido. Se emplea la siguiente ecuación para determinar las densidades aparentes:

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (2-9)$$

Donde:

M = Densidad aparente (peso volumétrico) del agregado

G = Peso del agregado más el molde

T = Peso del molde

V = Volumen del molde

Fotografía 2.6. Ensayo de densidades aparentes de los agregados



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Los resultados que muestran a continuación se obtienen del promedio de tres ensayos consecutivos, como se observa en el Anexo 4 y Anexo 5 respectivamente:

Tabla 2.10. Resultados de densidades aparentes de los agregados

		FINO				GRUESO			
		1	2	3	Prom	1	2	3	Prom
Densidad Suelta	gr/cm ³	1,620	1,628	1,616	1,621	1,326	1,328	1,318	1,324
Densidad Compactada	gr/cm ³	1,755	1,763	1,751	1,756	1,509	1,511	1,500	1,507

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

2.4.1.4. Contenido de humedad

El contenido de humedad se define como la relación entre el peso de agua contenido en una muestra, ya sea superficial o en los poros del agregado, y el peso seco de la misma, se expresa en porcentaje.

El contenido de humedad del material se emplea para corregir la cantidad de agua de la mezcla y el peso de material que se requiere para fabricar un hormigón de una resistencia determinada y características específicas; y así evitar disminución de resistencia o aceleración de fraguado.

La capacidad de los áridos para contener humedad, depende de su tamaño. A menor tamaño es mayor la capacidad de retención de agua.

Basándose en los procedimientos y requerimientos de la norma INEN 862 “Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad.” [62] – ASTM C 566 “Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying.” [22]:

$$P = \frac{A - B}{B} \times 100 \quad (2-10)$$

Donde:

P = Contenido de humedad de la muestra, en porcentaje

A = Peso de la muestra en estado natural

B = Peso seco de la muestra

Por tratarse de ensayos en laboratorio, en el diseño de las dosificaciones de los hormigones de este estudio se utilizan agregados secos, es decir con contenido de humedad del 0%. Por lo que el agua a emplearse deberá considerar un adicional para lograr la condición de los materiales saturada superficie seca (SSS), ya que las tablas de diseño consideran el material en esta condición.

2.4.1.5. Resistencia a la Abrasión

Este ensayo consiste en determinar la dureza, resistencia al desgaste, rotura o desintegración de las partículas sujetas a algún tipo de carga abrasiva mediante el uso de la Máquina de Los Ángeles, dicha propiedad depende principalmente de las características de la roca madre y además es considerada como un indicador de calidad del agregado [61].

Los requerimientos y procedimientos están establecidos en la norma INEN 860 “Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles.” [61] – ASTM C 131 “Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.” [6]. Consiste en colocar la muestra y la carga para el ensayo en la máquina de Los Ángeles, girar la máquina a 100 revoluciones y 500 revoluciones a una velocidad entre 30r/min y 33r/min, descargar el material y realizar una separación sobre un tamiz de mayor abertura que el N°12 (1,70mm), y tamizar la porción fina.

Fotografía 2.7. Máquina de los Ángeles

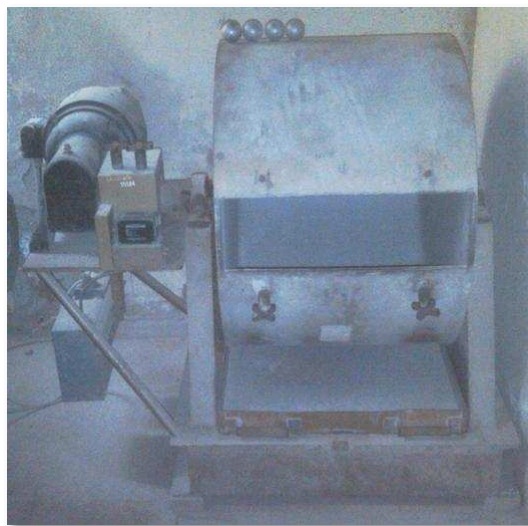


Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón.

El desgaste a la abrasión se calcula así:

$$D = \frac{B - C}{B} \times 100 \quad (2-11)$$

Donde:

D = valor de la abrasión, en porcentaje

B = peso inicial de la muestra antes del ensayo

C = peso de la muestra después del tamizado

En el Anexo 6, se observa los cálculos correspondientes a la abrasión del agregado grueso y se observan los siguientes resultados:

Tabla 2.11. Resultados de abrasión y coeficiente de uniformidad del agregado grueso

Porcentaje de pérdida 100 rev.	5,57 %
Porcentaje de pérdida 500 rev.	27,57 %
Coefficiente de Uniformidad	0,20

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Como se observa el valor del desgaste del agregado grueso utilizado tiene un porcentaje de desgaste menor al 50% establecido en las normas INEN 872 “Áridos para hormigón. Requisitos.” [63] – ASTM C 33 “Standard Specification for Concrete Aggregates.” [17].

La relación de porcentajes de pérdidas de 100 revoluciones sobre el porcentaje de pérdidas de 500 revoluciones, determina la uniformidad de la dureza de la

muestra denominado también coeficiente de uniformidad, y este no debe ser mayor que 0,2.

2.4.1.6. Contenido orgánico

Este ensayo indica la presencia de cantidades inapropiadas de impurezas orgánicas en el árido fino, utilizando colores normalizados (escala de Gardner), cuando la muestra proviene de minas de río principalmente.

Las impurezas orgánicas generalmente están formadas por partículas de humus, parte de este humus contiene ácido que neutraliza el agua alcalina catalizadora que reacciona con el cemento, deteriorando así la calidad de la pasta; la otra parte del humus recubre las partículas de arena formando una película, disminuyendo la adherencia con los otros componentes, de esta manera se explica la disminución de la resistencia en el hormigón.⁵

Los procedimientos e imposiciones se describen en las normas INEN 855 “Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón.” [57] – ASTM C 40 “Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete.”[19].

A 130 cm³ de muestra de árido fino se le agrega 75 cm³ de una solución normalizada de hidróxido de sodio (3%), se la agita y luego de 24 horas se compara el color del líquido que sobrenada la muestra con el comparador de colores.⁶

⁵ Gutiérrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

⁶ INEN. (2010). *NTE INEN 855. Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón*. (Primera ed.). Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

Fotografía 2.8. Ensayo de contenido orgánico de la arena



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

En el Anexo 7, se observan los cálculos correspondientes al contenido orgánico del agregado fino.

Tabla 2.12. Resultado de contenido orgánico de arena triturada

ENSAYO DE CONTENIDO ORGÁNICO	
Escala de Gardner	1

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Cuando la coloración de la muestra es mayor a 3 del comparador o color normalizado Gardner N° 11, el contenido de impurezas orgánicas es excesivo y debe ser analizado con mayor atención al agregado fino o desechado para fines estructurales.

Como se observa en los resultados de los ensayos practicados a los agregados, éstos cumplen con las disposiciones de la norma INEN 872 “Áridos para

hormigón. Requisitos.” [63] – ASTM C 33 “Standard Specification for Concrete Aggregates.” [17], lo que garantiza las condiciones necesarias para el diseño de un hormigón patrón, a fin de observar claramente la incidencia del PET en éste.

2.4.2. AGUA

Para el desarrollo de este proyecto se emplea el agua potable del Distrito Metropolitano de Quito, sabiendo que el agua potable es apta para la elaboración y curado del hormigón.

“El agua que produce la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento cumple con la Norma INEN 1008:2011, cuarta revisión, que establece los parámetros de calidad que garantizan que el agua distribuida es inocua para los seres humanos y por lo tanto segura para su uso y consumo.”⁷

El agua cumple las siguientes funciones en su calidad de componente del hormigón:

- Participa en las reacciones de hidratación del cemento.
- Proporciona la trabajabilidad necesaria para la puesta en obra.
- Actúa reponiendo el agua perdida por las reacciones exotérmicas y para refrigerar la masa (agua de curado).

En el caso de no disponer de agua potable para la elaboración de hormigón, el agua utilizada será analizada de acuerdo a la norma ASTM C 1602 “Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.” [9], cuyos parámetros principales se muestra en la siguiente tabla.

⁷ Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. (2012). *Calidad del Agua. Análisis mensual.*

http://www.emaapq.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=233

Tabla 2.13. Requisitos para el agua de mezclado

CONCENTRACIONES EN AGUA DE MEZCLA	LÍMITES (máx.)
Cloruros, como Cl.	
-para hormigón pretensado.	500 miligramos/litro
-para hormigón armado o con elementos metálicos embebidos.	1000 miligramos/litro
Sulfatos, como SO ₄ .	3000 miligramos/litro
Álcalis, como (Na ₂ O + 0,658K ₂ O).	600 miligramos/litro
Total de sólidos (por masa).	50000 miligramos/litro

Fuente: INECYC. (2007). El Manual de Pepe Hormigón.

A continuación se muestran los efectos en la calidad del hormigón de ciertas impurezas del agua de mezclado como azúcares, ácidos, materia orgánica, aceites, sulfatos, sales alcalinas, efluentes de cloacas, sólidos suspendidos y gases [65] [76]:

- Alteraciones en el proceso de fraguado, propiedades físicas y resistencias.
- El contenido de cloruros en el agua, provoca corrosión de la armadura de refuerzo.
- Alto contenido orgánico disminuye la resistencia última.

2.4.3. CEMENTO

El cemento en el hormigón es un conglomerante hidráulico, producido al pulverizar clinker y una o más formas de sulfato de calcio como adición de molienda, el material cementante mezclado con agua conforma una masa sólida de resistencia y durabilidad, tanto en el aire, como bajo agua.

Durante el desarrollo experimental del estudio se utilizó cemento hidráulico tipo GU, que se emplea para la obtención de hormigones de uso general que no requieren propiedades especiales. Este cemento cumple con los requerimientos de la norma INEN 2380 "Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para

cementos hidráulicos.” [54] – ASTM C 1157 “Standard Performance Specification for Hydraulic Cement.” [3].

De acuerdo a las normas antes mencionadas los tipos de cementos se muestran en la tabla 2.14:

Tabla 2.14. Clasificación de los cementos, INEN 2380 – ASTM C 1157

TIPO	USO
GU	Para construcción en general.
HE	Alta resistencia inicial.
MS	Moderada resistencia a los sulfatos.
HS	Alta resistencia a los sulfatos.
MH	Moderado calor de hidratación.
LH	Bajo calor de hidratación.

Fuente: INEN. (2011). NTE INEN 2380. Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Las características físicas más importantes del cemento para el diseño de las mezclas y control de calidad son: densidad real, consistencia normal, tiempos de fraguado y densidades aparentes.

2.4.3.1. Densidad real

Se conoce a la densidad real como la masa de un volumen unitario de sólidos, cuyo valor está alrededor de 3,00 g/cm³, ya que el cemento es uno de los materiales más pesados. [76]

Según la norma INEN 156 “Cemento hidráulico. Determinación de la densidad.” [47] - ASTM C 188 “Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.” [11]. Llenar el frasco L’Chatelier con querosén libre de agua o gasolina hasta un punto

en la parte baja del cuello entre las marcas 0cm^3 y 1cm^3 , registrar la primera lectura (L_1) y pesarlo (P_1). Introducir alrededor de 64g en pequeños incrementos en el frasco, si se añadió la cantidad adecuada, el nivel del líquido estará en algún punto de la graduaciones en la parte superior del cuello, colocar el tapón y rodarlo hasta liberar el aire y registrar la lectura final (L_2) y el peso final (P_2).

Fotografía 2.9. Material y equipo para ensayo de densidad real del cemento



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Es decir, este ensayo consiste en establecer la relación entre una masa de cemento y el volumen del líquido no reactivo que esta masa desplaza en el frasco de Le Chatelier, así:

$$D_{\text{real}} = \frac{P_2 - P_1}{L_2 - L_1} \quad (2-12)$$

Donde:

D_{real} = Densidad real (g/cm^3)

P_2 = Peso final del frasco con reactivo y cemento

P_1 = Peso inicial del frasco con reactivo

L_2 = Lectura final en un punto en la parte alta del cuello entre las marcas 18 cm³ y 24 cm³

L_1 = Lectura inicial en un punto en la parte baja del cuello entre las marcas 0 cm³ y 1 cm³

La densidad promedio obtenida del resultado de tres muestras es de 2.87 g/cm³, como se observa en el Anexo 8.

2.4.3.2. Consistencia normal

“La consistencia normal se define como el estado de una cantidad de cemento cuando se encuentran hidratadas todas y cada una de sus partículas.”⁸

El mezclado de la pasta se realiza de acuerdo a la norma INEN 155 “Cemento Hidráulico. Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica.” [46] – ASTM C 305 “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.” [15], y los procedimientos para la obtención de la consistencia normal en la norma INEN 157 “Cemento hidráulico. Determinación de la consistencia normal. Método de Vicat.” [48] – ASTM C 187 “Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement.” [10].

La determinación de la consistencia normal, se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de 10 mm ± 1 mm de la varilla del aparato de Vicat en 30 segundos después de haber sido soltada.

⁸ Monroy, C., & Luna, G. (1985). *Cementos y hormigones. Instructivo de Laboratorio*. Quito, Ecuador.

El resultado se expresa como la relación entre la masa de agua requerida y la masa de cemento hidráulico, expresada en porcentaje.

Fotografía 2.10. Ensayo de consistencia normal



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

De donde:

$$C\% = \frac{M_a}{M_c} \times 100 \quad (2-13)$$

C = Consistencia normal (%)

M_a = Peso del agua

M_c = Peso del cemento

La consistencia normal del cemento es de **26.5 %**, se puede observar en el Anexo 9 y es el promedio de tres muestras.

2.4.3.3. Densidades aparentes

La densidad aparente es la masa del cemento necesaria para ocupar un volumen unitario especificado, varía de acuerdo al grado de compactación.

El procedimiento para determinar las densidades aparentes del cemento consiste en:

- Calibrar un molde plástico.
- Para hallar la densidad suelta se debe llenar el molde sin producir vibraciones y enrasar cuidadosamente. En el caso de la densidad compactada colocar el cemento en 3 capas iguales dejando caer el molde 25 veces de una altura de 2 cm por cada capa.
- Limpiar y pesar el molde con cemento.

De donde:

$$V_r = \frac{\pi \phi^2 h}{4} \quad (2-14)$$

V_r = volumen del recipiente

h = altura del recipiente

ϕ = diámetro interior del recipiente

$$\gamma_s = \frac{W_{cs}}{V_r} \quad (2-15)$$

$$\gamma_c = \frac{W_{cc}}{V_r} \quad (2-16)$$

γ_s = Densidad suelta del cemento.

W_{CS} = Peso del cemento suelto.

γ_C = Densidad compactada del cemento.

W_{CC} = Peso del cemento compactado.

Fotografía 2.11. Ensayo de densidades aparentes



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Como se puede observar en el Anexo 10, los promedios de las tres muestras en el ensayo son:

- La densidad aparente suelta es de **1.00 g/cm³**.
- La densidad aparente compactada es de **1.31 g/cm³**.

2.4.3.4. Tiempos de fraguado

Se entiende por fraguado, la condición alcanzada por la pasta cuando ha perdido plasticidad hasta un nivel arbitrario, generalmente medidos en términos de resistencia a la penetración o deformación. [52]

El inicio del fraguado se define cuando la aguja de Vicat penetra 10 mm en 30 seg, es decir cuando la pasta se deforma fácilmente por la acción de pequeñas cargas. Y el fin de fraguado va desde el fraguado inicial hasta que se obtenga una pasta indeformable con una resistencia suficiente para soportar su propio peso.

Para determinar los tiempos de fraguado se utiliza el aparato Vicat, empleando el método A que es el operado manualmente, de acuerdo con la norma INEN 158 “Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat.” [52] – ASTM C 191 “Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.” [12].

Fotografía 2.12. Ensayo de tiempos de fraguado



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Como se puede observar en el Anexo 11:

- El tiempo inicial del fraguado es a los **150 min.**
- El tiempo final del fraguado es a los **450 min.**

En la Tabla 2.15, se muestra un resumen de las propiedades físicas descritas para el cemento hidráulico tipo GU:

Tabla 2.15. Resumen de las propiedades físicas del cemento

PROPIEDAD FÍSICA		UNIDAD	VALOR	RANGO ⁹
Densidad real		g/cm ³	2.87	(2,90 – 3,15)
Consistencia normal		%	26.5	(26 – 33)
Densidad aparente suelta		g/cm ³	1.00	(0,96 – 1,28)
Densidad aparente compactada		g/cm ³	1.31	(1,20 – 1,40)
Tiempo de fraguado	Inicial	min	150	(45 – 420)
	Final	min	450	-

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Se observa que los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos.

2.4.4. PET

2.4.4.1. Generalidades

Los polímeros de acuerdo a su aplicación, se clasifican en: Termoestables, Termoplásticos, Elastómeros y Fibras¹⁰, como se indica en la Tabla 2.16.

El PET, polietileno tereftalato, es un polímero o plástico de alta calidad, a partir de la década de los 70 se emplea en la fabricación de envases ligeros, transparentes y resistentes, principalmente para bebidas.

⁹ INECYC, *Manual de Pepe Hormigón*, Primera Edición, Quito 2007.

¹⁰ Llorens, J. (25 de Enero de 2008). *Universidad Politécnica de Valencia. Polimedia*. Obtenido de Clasificación de los polímeros: <https://polimedia.upv.es/visor/?id=ac48788e-890e-2b41-b8be-3c6f3f944811>

Tabla 2.16. Clasificación de los polímeros de acuerdo a su uso

TIPO	MATERIAL	APLICACIONES
Termoestables	Resina poliéster	Encapsulados, láminas acanaladas.
	Resina Fenólica	Apagadores de luz.
	Resina Melamínica	Vajillas.
	Poliuretano	Colchones, espumas y rellenos de muebles.
Termoplásticos	Polietileno Tereftalato (PET)	Botellas, envases termoformados.
	Polietileno baja densidad (LDPE/PEBD)	Bolsas.
	Polietileno alta densidad (HDPE/PEAD)	Bolsas tipo papel, tuberías, cubetas, macetas, botellas.
	Cloruro de polivinilo (PVC)	Juguetes, tubería, cable eléctrico, mangueras, tarjetas de crédito, etc.
	Polipropileno (PP)	Recipiente de comida, sillas para jardín, películas, filamento para pañal, ganchos.
	Poliestireno (PS)	Estuches de cosméticos, envases termoformados.
	Acrilonitrilo-butadieno-estireno	Carcasas de teléfonos, batidoras, licuadoras, máquinas de escribir.
	Nylon	Engranajes, ruedas de patines.
Elastómeros	Caucho sintético, látex, neopreno	Neumáticos, guantes, trajes especiales impermeables.
Fibras	Poliamidas y poliésteres	Tejidos impermeables, tejidos de alta resistencia, mallas en invernaderos.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Fotografía 2.13. PET (Polietileno-tereftalato)








Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

La fabricación de estos envases se consigue a través de un proceso de inyección-estirado-soplado que parte de la resina de PET. Esta resina se obtiene a partir de dos materias primas derivadas del petróleo: etileno y paraxileno.¹¹

Para recolectar, reciclar, identificar y separar los diferentes productos plásticos, “The Society of the Plastics Industry (SPI)” ha desarrollado la siguiente codificación:

¹¹ Fundación para la Investigación y el Desarrollo Ambiental. (s.f.). *Reciclaje por materiales. Tereftalato de polietileno*. Obtenido de <http://www.fida.es:8001/fida/VisNot?id=7df051f76b411a4a92b25585c374fc>

Tabla 2.17. Sistema de códigos de los principales plásticos

CÓDIGOS DE RECICLADO DE PLÁSTICOS		
Códigos		Recomendaciones
	PET (Tereftalato de polietileno). Reciclado 23%	Diseñados para un solo uso. Su uso extendido aumenta el riesgo de filtraciones y bacterias.
	HDPE (Polietileno de alta densidad). Reciclado 27%	Considerado seguro.
	PVC (Policloruro de vinilo). Reciclado. 1%	Evitar. Puede filtrar el ftalato en la comida o el líquido de envase.
	LDPE (Polietileno de baja densidad) Reciclado: 1%	Considerado seguro.
	PP (Polipropileno) Reciclado: 3%	Considerado seguro.
	PS (Poliestireno) Reciclado. 1%	Evitar. Puede filtrar el estireno, un posible causante del cáncer y alteraciones hormonales.
	OTROS (A menudo poli carbonatos) Reciclado: 1%	Evitar. Puede filtrar el bisfenol A (BFA), posible causante de daño cromosómico.

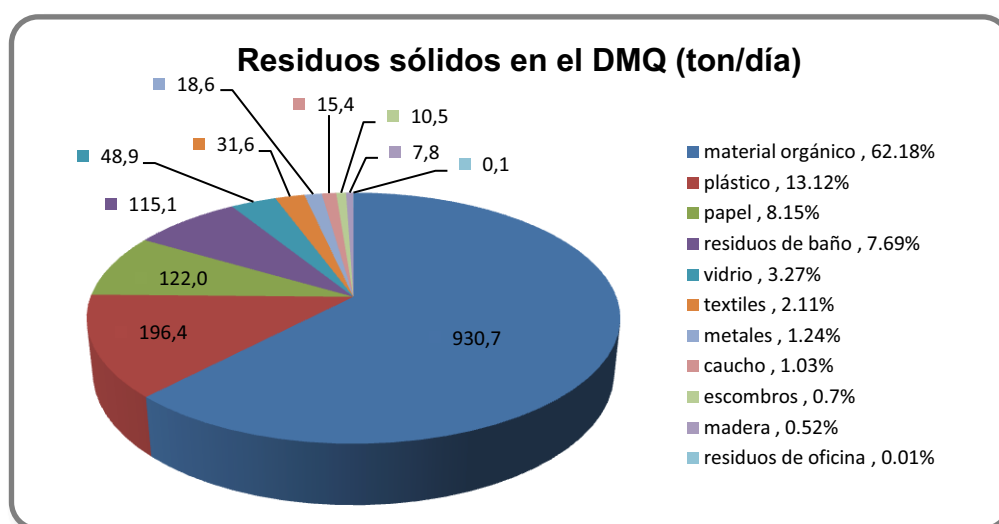
Fuente: The Society of the Plastics Industry. (s.f.). *SPI. The plastic industry trade association.*

2.4.4.2. Efectos provocados por el uso de PET

Durante el primer trimestre del 2010, en el DMQ se recolectó un total de 134.712,40 toneladas, que significó un promedio de 1.496,80 toneladas día, la gran mayoría de residuos provienen de desechos orgánicos (62,18%), los cuales pasarán a ser reciclados mediante un proceso de compostaje dentro del nuevo modelo de gestión de residuos. Seguidamente, en porcentaje de producción se

encuentran desechos plásticos y de papel con un 13,12% y 8,15% respectivamente, materiales que son fácilmente reciclables.¹²

Figura 2.8. Producción diaria de residuos sólidos en el DMQ (ton/día)



Fuente: EMASEO. (2010). Plan de servicios de aseo - Administración Zonal La Delicia.
Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

2.4.4.3. Reciclaje del PET

Una de las iniciativas que ha tenido resultados positivos y de donde se obtendrá el PET para el estudio es el Centro de Capacitación para el cuidado de la Naturaleza (CCUNA), nace de un acuerdo con la Oficina de la Cooperación al Desarrollo de la Embajada de Bélgica, el aporte de la Familia Ortiz Crespo, la Fundación Liceo Internacional y el Colegio "Fernando Ortiz Crespo", ubicado en la parroquia de Zámbriza de la ciudad de Quito, quienes reunieron en el 2009 alrededor de \$22 mil dólares para ejecutar proyectos ecológicos como la campaña de reciclaje.

¹² EMASEO. (2010). *Plan de servicios de aseo - Administración Zonal La Delicia*. Quito.

Grupo de estudiantes de los colegios de la ciudad de Quito, Fernando Ortiz Crespo, Inmaculada, Liceo Internacional, San Camilo, desarrollan un proyecto de reciclaje de botellas plásticas PET en la parroquia de Zámbriza el primer sábado de cada mes denominado “Zámbriza sin botellas plásticas”.

Se realizan charlas de capacitación a los estudiantes en materia de reciclaje durante 3 horas diarias, dos veces a la semana, con temas sobre liderazgo, derechos de la naturaleza entre otros, con el propósito de sensibilizarlos con el cuidado de su medio ambiente.

Fotografía 2.14. Capacitación estudiantil



Foto: Colegio Fernando Ortiz Crespo

Previo a la recolección de botellas se entregan “fundas reutilizables” y boletines de información a los moradores de la parroquia.

Fotografía 2.15. Entrega de fundas reutilizables y boletines



Foto: Colegio Fernando Ortiz Crespo

Con la colaboración de entidades públicas, se retira de cada casa las botellas recicladas, las mismas son depositadas en la planta recicladora del colegio que cuenta con un molino para triturar las botellas, donado por la empresa Florempaque, donde se procesa 150 kilos de botellas plásticas por hora.

Fotografía 2.16. Ayuda comunitaria para la recolección



Foto: Colegio Fernando Ortiz Crespo

Fotografía 2.17. Almacenaje durante el día de campaña



Foto: Colegio Fernando Ortiz Crespo

Fotografía 2.18. Máquina trituradora de PET



Foto: Colegio Fernando Ortiz Crespo

Fotografía 2.19. Trituración del PET



Foto: HOY. (04 de Marzo de 2010). *Botellas viejas se convierten en polvo.*

Este material reciclado actualmente es empleado como agregado en la elaboración de bloques, artesanías, en la fabricación de pupitres y este estudio pretende desarrollar un hormigón PET a fin de emplearlo en la construcción de estructuras menores.

Fotografía 2.20. Usos del material reciclado PET

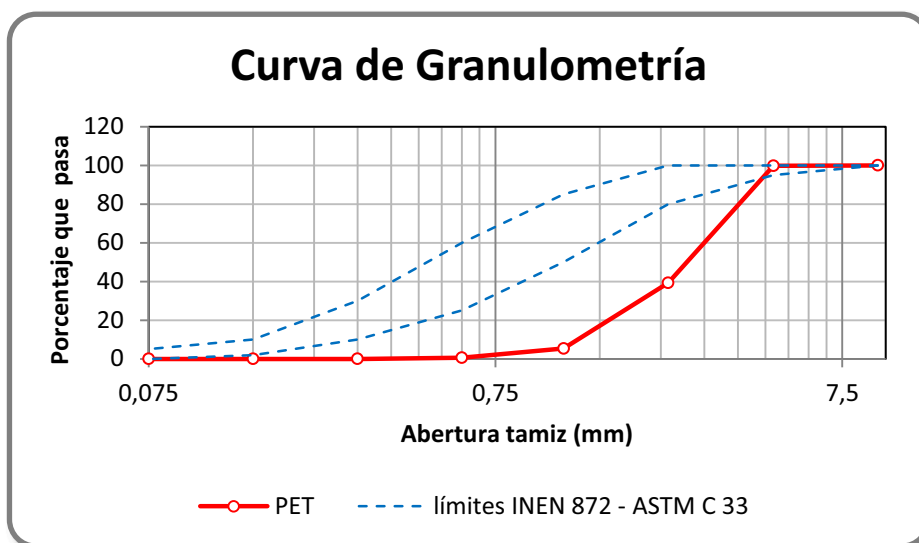


Foto: Colegio Fernando Ortiz Crespo

2.4.4.4. Características del PET

Para determinar las características del PET necesarias para el diseño del hormigón, se utiliza los procedimientos descritos para el agregado fino según las normas INEN y ASTM correspondientes para los ensayos de granulometría y densidades aparentes.

Figura 2.9. Análisis granulométrico del PET



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Se observa una mala gradación del material, ya que casi todo el material está constituido por partículas de 2.36mm (Nº 8) y 1.18mm (Nº16), con un módulo de finura de 4.55. Además el PET tiene una geometría plana con sus aristas vivas.

Los resultados obtenidos del ensayo de densidades aparentes del PET se muestran a continuación:

Tabla 2.18. Resultados de densidades aparentes del PET

	PET
DENSIDAD SUELTA (gr/cm^3)	0,386
DENSIDAD COMPACTADA (gr/cm^3)	0,469

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

De la definición de densidad, donde la densidad de un material se define como la relación entre su masa y su volumen, se obtiene un peso específico del PET de $0,8 \text{ g/cm}^3$.

2.4.5. ACERO

Para realizar los ensayos de adherencia, se utiliza “varilla de construcción NOVACERO”¹³, barras redondas con corrugaciones inclinadas a 55° de 12mm de diámetro, elaboradas mediante un proceso de laminación en caliente, bajo la norma INEN 102 “Varillas corrugadas de acero al carbono laminadas en caliente para hormigón armado. Requisitos.” [44] - ASTM A 615 “Standard Specification for Deformed and Plain Billet-Steel Bar for Concrete Reinforcement.” [29].

Tabla 2.19. Especificaciones técnicas del Acero

Especificaciones técnicas del Acero	
Grado	A42
Límite de Fluencia Mínimo	4200 kg / cm ²
Resistencia a la Tracción Mínima	6300 kg / cm ²
Porcentaje de Alargamiento Mínimo	Lo = 200 mm
Longitud de Entrega	6, 9, 12 m
Peso varilla Ø 8mm	0.888 kg/m

Fuente: NOVACERO. (s.f.). NOVACERO - VARILLA DE CONSTRUCCIÓN

¹³ NOVACERO. (s.f.). NOVACERO - VARILLA DE CONSTRUCCIÓN. Obtenido de <http://www.novacero.com/client/product.php?p=7&topm=-1>

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL ESTUDIO

3.1. DOSIFICACIÓN

Para producir un concreto que satisfaga con los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso, este deberá poseer las siguientes propiedades:

- La trabajabilidad aceptable en el concreto fresco.
- Resistencia, durabilidad, densidad y apariencia en el concreto endurecido.
- Economía.

La información requerida para diseño de mezclas se muestra en la siguiente tabla:

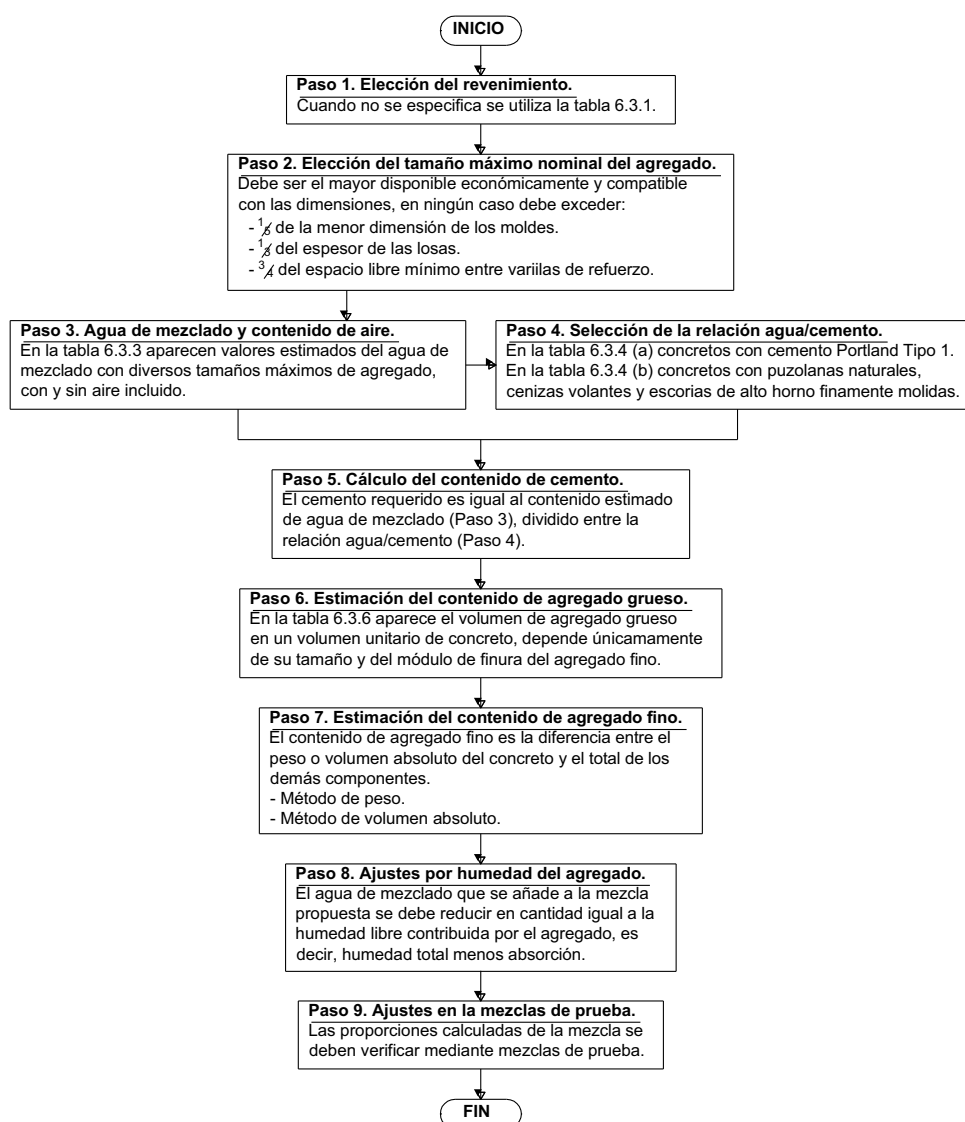
Tabla 3.1. Información requerida de los componentes para el diseño de mezclas

COMPONENTE		INFORMACIÓN REQUERIDA	
AGREGADO	GRUESO	Peso específico.	2,481 g/cm ³
		Densidad aparente suelta.	1,324 g/cm ³
		Densidad aparente compactada.	1,507 g/cm ³
		Tamaño máximo del agregado.	1 ¼"
		Análisis granulométrico.	MF = 7,18
	FINO	Humedad y absorción.	0% , 3,01%
		Peso específico.	2,463 g/cm ³
		Densidad aparente suelta.	1,621 g/cm ³
		Densidad aparente compactada.	1,756 g/cm ³
		Análisis granulométrico.	MF = 2,89
		Humedad y absorción.	0% , 3,66%
CEMENTO		Tipo y marca.	GU
		Densidad real.	2,870 g/cm ³
PET		Peso específico.	0.80 g/cm ³
		Densidades aparentes suelta y compactada.	0.386 ; 0.469
		Humedad y absorción.	0% ; 0.1%
AGUA		Peso específico.	1,000 g/cm ³

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Para el diseño o proporcionamiento de las mezclas de concreto se utiliza el método empírico ACI 211.1 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete” [1], por cuanto es el resultado de una serie de investigaciones experimentales, basándose en el cálculo del volumen absoluto ocupado por los componentes del hormigón. Este método consiste en un proceso de pasos interrelacionados, como se muestra en el siguiente diagrama:

Figura 3.1. Diagrama para el diseño de la mezcla de un concreto normal



Fuente: - ACI Committee 211. (2002). ACI 211.1-91. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.

- Nawy, E. (1988). Concreto Reforzado. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.1.1. HORMIGÓN CONVENCIONAL

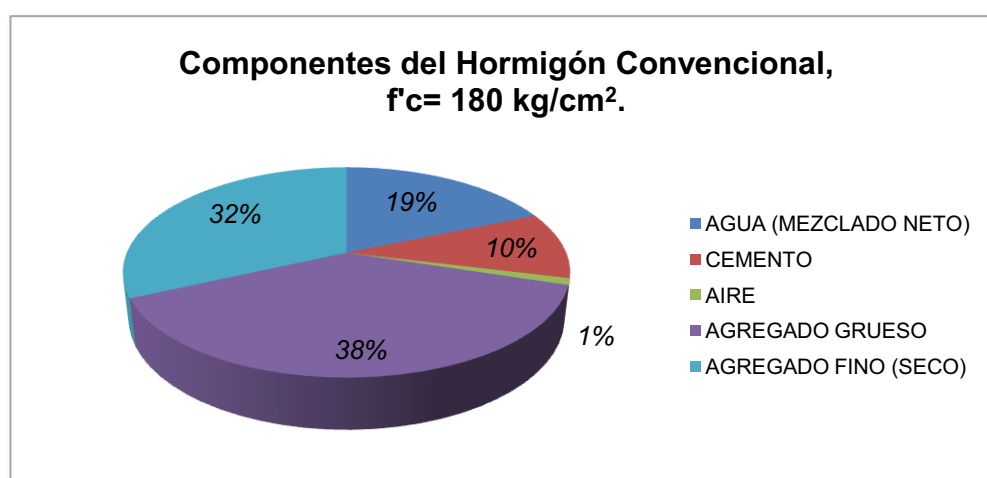
Con el procedimiento antes descrito se obtienen las proporciones para el diseño de un metro cúbico de los hormigones convencionales y que se muestran en las siguientes tablas, para el caso de hormigones convencionales de $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$; y en las figuras se presentan los porcentajes de cada uno de los componentes de estos hormigones. Se puede observar el procedimiento completo del diseño de las mezclas en el Anexo 14.

Tabla 3.2. Dosificación final del hormigón convencional, $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$

COMPONENTES	PESO (kg)
Agua	245,23
Cemento	294,30
Agregado Grueso	979,55
Aire	0,00
Agregado Fino	812,73
<i>TOTAL</i>	2331,82
a/c = 0,632 ; 1 : 2.76 : 3.33 : 0	

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 3.2. Porcentaje de los componentes del Hormigón Convencional, $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$



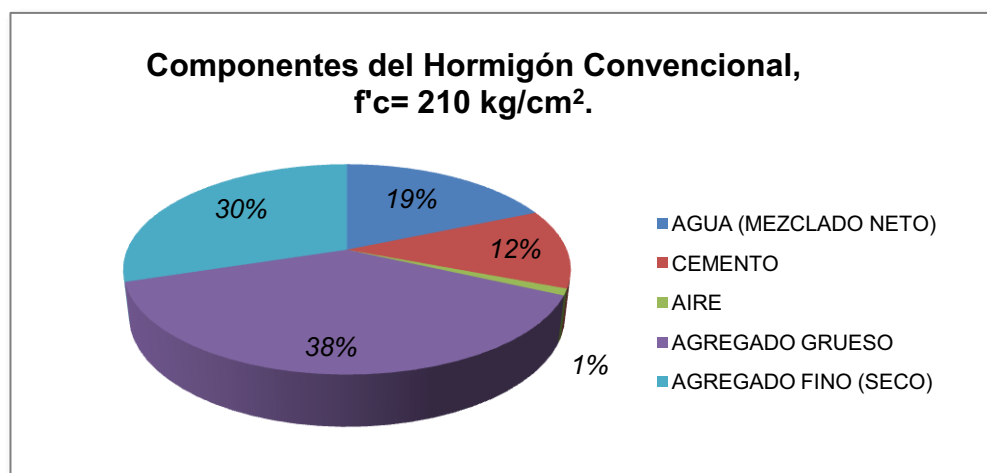
Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Tabla 3.3. Dosificación final del hormigón convencional, $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

COMPONENTES	PESO (kg)
Agua	243,39
Cemento	350,94
Agregado Grueso	979,55
Aire	0,00
Agregado Fino	762,33
<i>TOTAL</i>	<i>2336,21</i>
a/c = 0,53 ; 1 : 2.17 : 2.79 : 0	

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 3.3. Porcentaje de los componentes del hormigón convencional, $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.1.2. HORMIGÓN CON VARIOS PORCENTAJES DE PET

Siendo el PET un material inerte puede ser empleado como agregado, y de acuerdo a las propiedades obtenidas en el laboratorio se observa una similitud con la arena ya que, su grado de trituración, tiene un tamaño máximo $3/8''$, es por esto que una vez determinado las proporciones del hormigón patrón, se procede a reemplazar en porcentaje de volumen de agregado fino con PET, a fin de obtener

una curva que muestre la variación de la resistencia a compresión de acuerdo al porcentaje del plástico incorporado.

Al reemplazar el 10%, 25%, 50% y 75% de arena por el PET, se obtuvieron las siguientes dosificaciones:

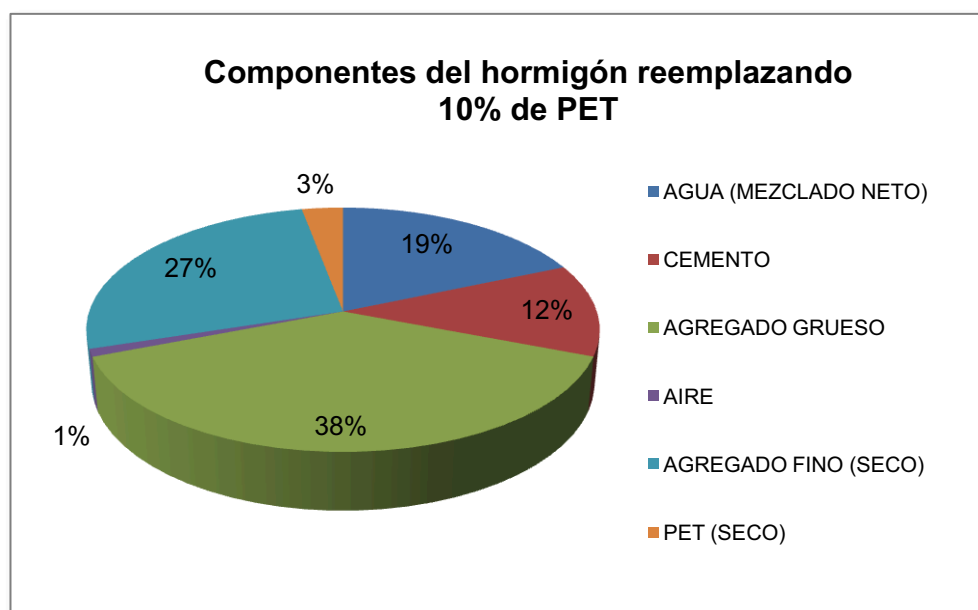
Tabla 3.4. Dosificación de los hormigones con varios porcentajes de PET

	10%	25%	50%	75%
	PESO (kg)	PESO (kg)	PESO (kg)	PESO (kg)
AGUA	240,60	236,41	229,44	222,46
CEMENTO	350,94	350,94	350,94	350,94
A. GRUESO	979,55	979,55	979,55	979,55
AIRE	0,00	0,00	0,00	0,00
A. FINO	686,10	571,75	381,16	190,58
PET	23,88	59,70	119,39	179,09
TOTAL	2281,06	2198,35	2060,49	1922,63
a/c = 0,53	1 : 1.96 : 2.79 : 0.07	1 : 1.63 : 2.79 : 0.17	1 : 1.09 : 2.79 : 0.34	1 : 0.54 : 2.79 : 0.51

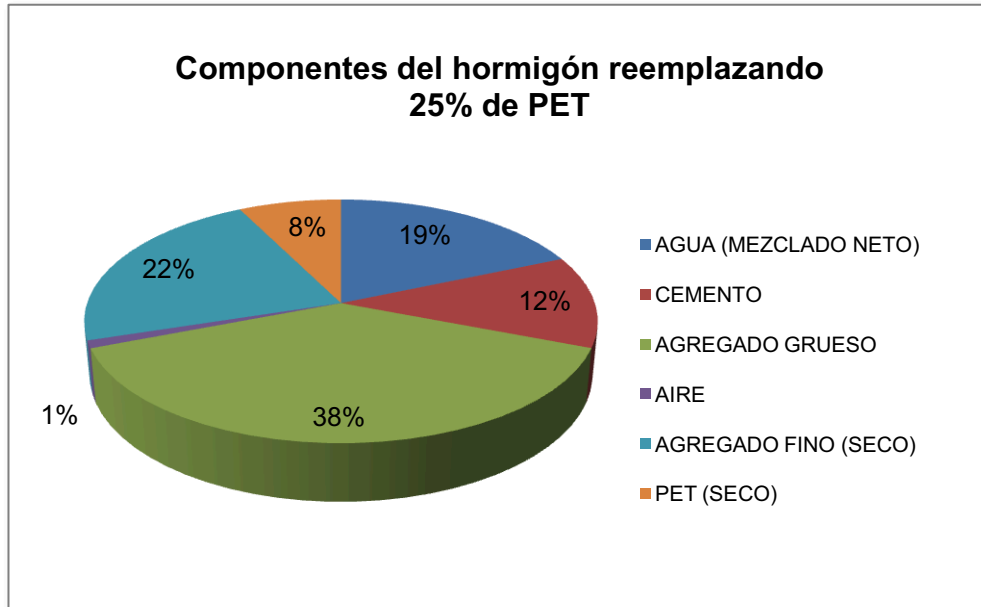
Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

En las siguientes figuras se muestran los porcentajes de los componentes de cada uno de los hormigones antes mencionados, y se puede observar claramente que únicamente varían los porcentajes de arena y PET:

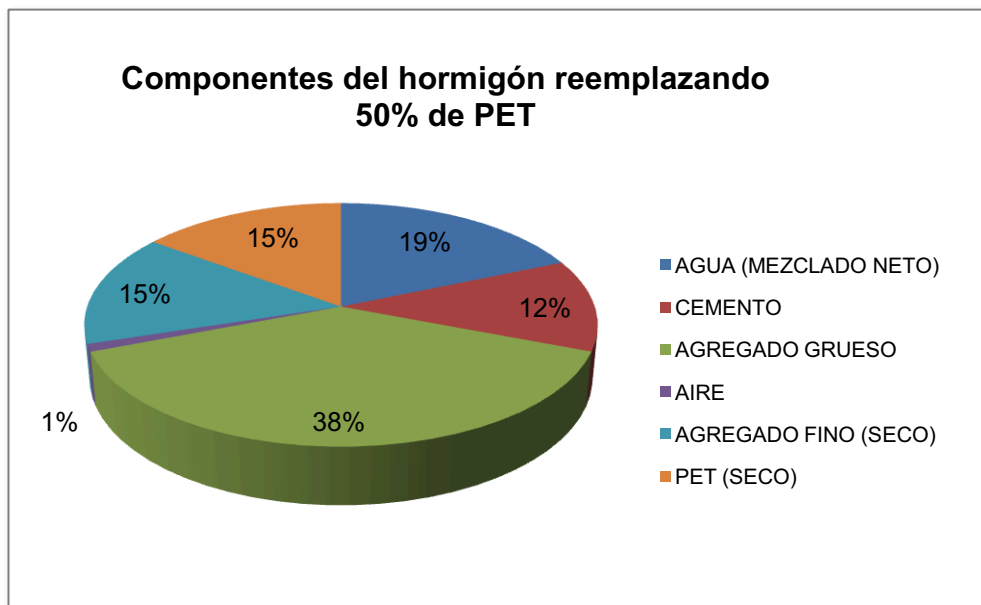
Figura 3.4. Componentes del hormigón reemplazando 10% de PET



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

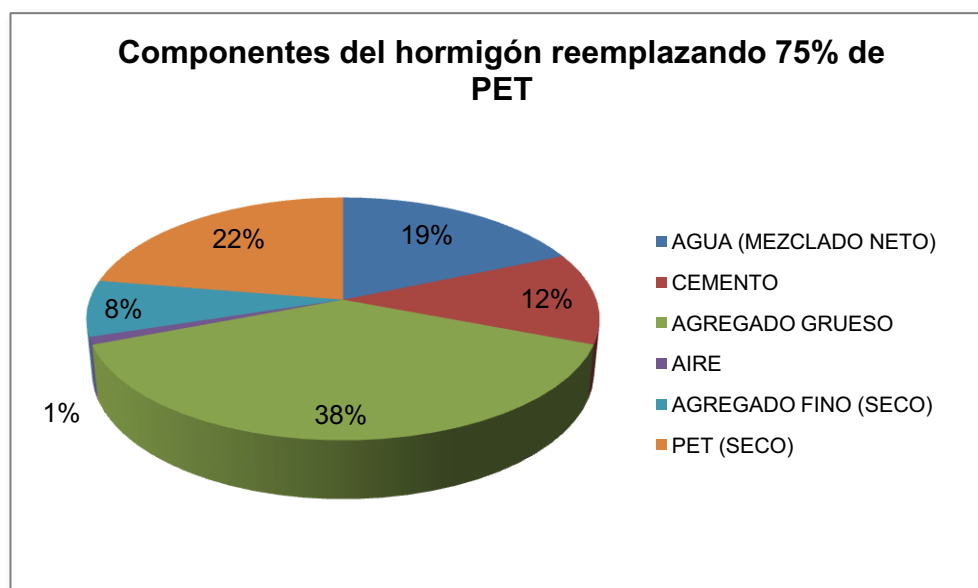
Figura 3.5. Componentes del hormigón reemplazando 25% de PET

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 3.6. Componentes del hormigón reemplazando 50% de PET

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 3.7. Componentes del hormigón reemplazando 75% de PET



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

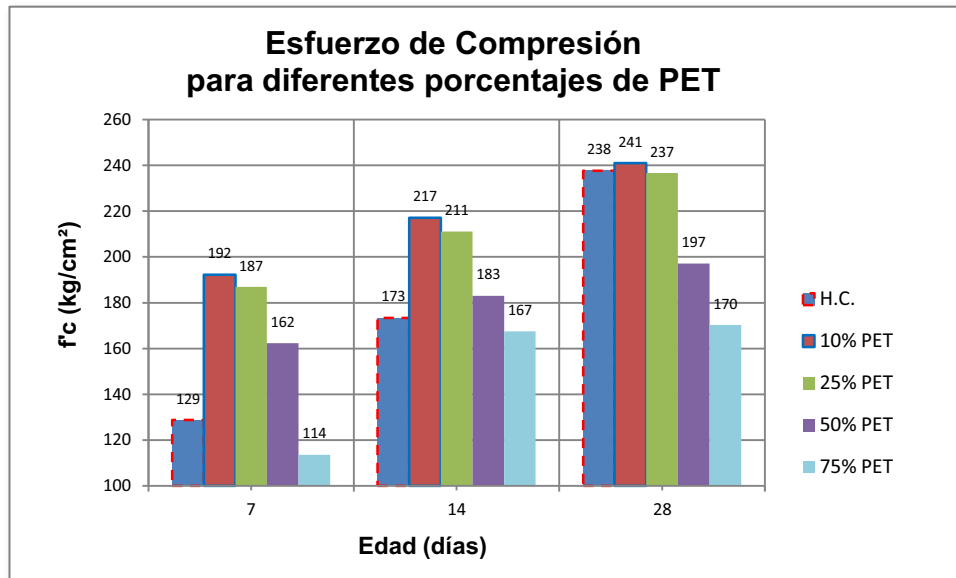
Para la elección del porcentaje de agregado fino a reemplazar con PET, se realiza probetas cilíndricas para observar la influencia del PET en la resistencia a compresión, siendo ésta una de las propiedades predominantes del hormigón. En la siguiente tabla se muestran los esfuerzos de compresión correspondientes a los 7, 14 y 28 días, para cada porcentaje de PET incorporado:

Tabla 3.5. Esfuerzos de compresión del hormigón con varios porcentajes de PET

Porcentaje de PET	Esfuerzo de Compresión (kg/cm ²).		
	7 días	14 días	28 días
HC (0%)	129	173	238
10%	192	217	241
25%	187	211	237
50%	162	183	197
75%	114	167	170

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 3.8. Esfuerzo de compresión del hormigón con varios porcentajes de PET



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Como se muestra en la Figura 3.8, al reemplazar en un 10% el agregado fino con PET no existe reducción de la resistencia a compresión, pero el volumen de encapsulación del material reciclado no es considerable; al contrario al reemplazar la arena con un 50% o 75% de PET la resistencia a compresión obtenida es menor a 210kg/cm^2 , es decir no satisface los requerimientos sin embargo se encapsula gran cantidad de plástico reciclado.

Se adopta como adecuado el 25% de PET, debido a que si bien el esfuerzo a compresión disminuye solo en un 0,4%, que es un valor aceptable, la cantidad de material reciclado incorporado es considerable, y es un porcentaje manejable por comprobación experimental.

3.1.3. HORMIGÓN PET

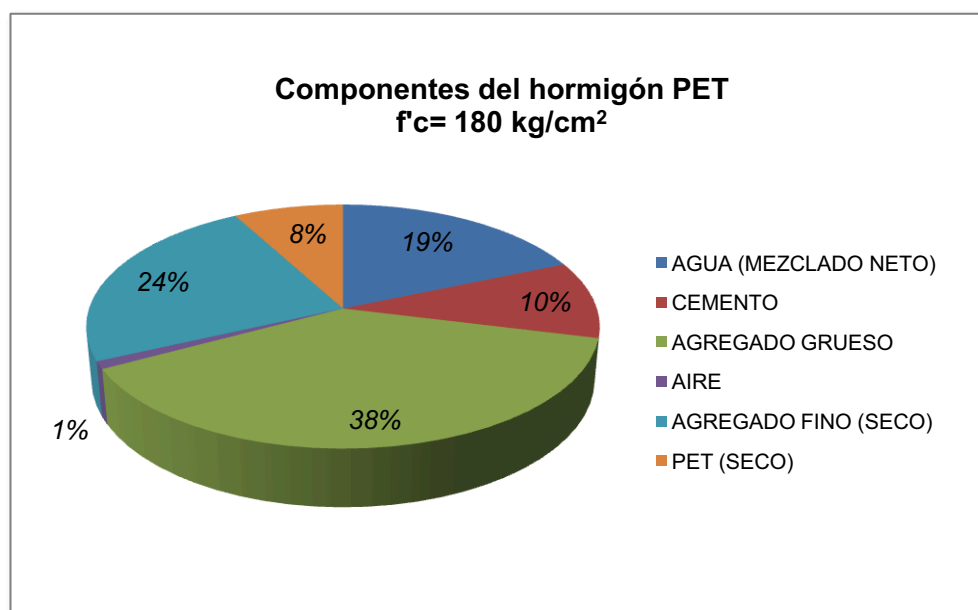
De manera análoga, para obtener un hormigón PET de $f'c = 180\text{kg/cm}^2$, se utiliza el mismo porcentaje de sustitución; es decir el 25% de la cantidad de arena es reemplazado por PET, y se tiene como dosificación final:

Tabla 3.6. Dosificación final del hormigón PET, $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$

COMPONENTES	PESO (kg)
Agua	237,794
Cemento	294,304
Agregado Grueso	979,550
Aire	0,000
Agregado Fino	609,55
PET	63,64
<i>TOTAL</i>	<i>2184,84</i>
a/c = 0,632 ; 1 : 2.07 : 3.33 : 0.22	

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 3.9. Porcentaje de los componentes del hormigón PET, $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

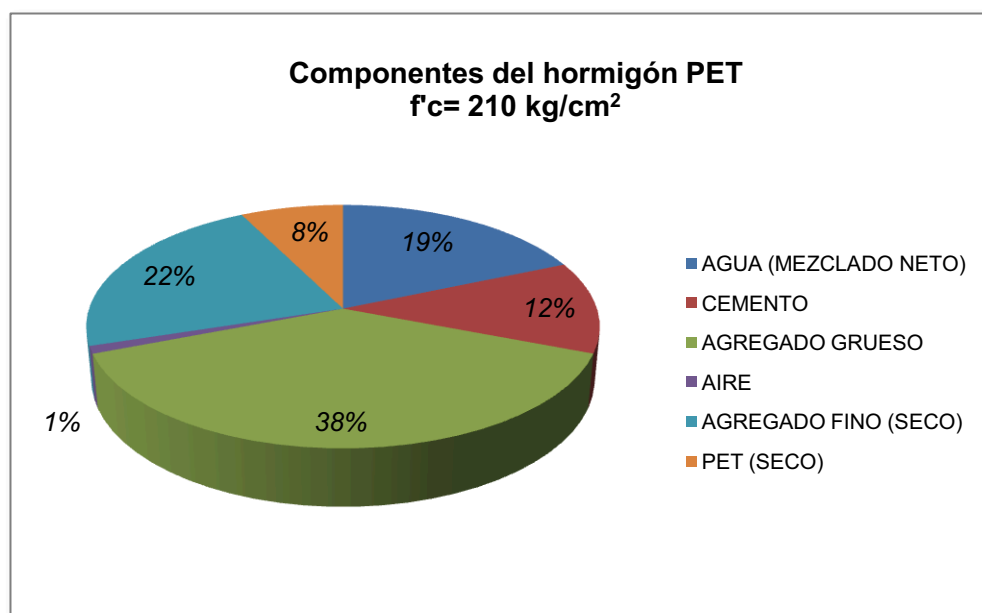
La tabla siguiente muestra la dosificación final del hormigón PET para un esfuerzo de compresión $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 3.7. Dosificación final del hormigón PET, $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

COMPONENTES	PESO (kg)
Agua	236,41
Cemento	350,94
Agregado Grueso	979,55
Aire	0,00
Agregado Fino	571,75
PET	59,70
<i>TOTAL</i>	<i>2198,35</i>
$a/c = 0,53$; $1 : 1.63 : 2.79 : 0.17$	

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 3.10. Porcentaje de los componentes del hormigón PET, $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2. ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN PET

Al ser el objetivo principal del presente proyecto comparar el comportamiento del hormigón PET con el del hormigón convencional, es necesario realizar todos los ensayos pertinentes de acuerdo a la normativa vigente, con el fin de determinar las principales propiedades.


3.2.1. PREPARACIÓN, ENCOFRADO, FUNDIDO Y CURADO

En este estudio se utilizarán probetas cilíndricas y prismáticas dependiendo del tipo de ensayo a realizar para efectuar el control de las propiedades mecánicas del hormigón, siguiendo lo señalado en la norma INEN 1576 “Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo.” [50] - ASTM C 31 “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the field.” [16].

3.2.1.1. Probetas

En el desarrollo de la investigación se preparan un mínimo de tres probetas cilíndricas para cada ensayo, con las características que se muestran:

Tabla 3.8. Probetas Cilíndricas

 <p>PROBETA CILÍNDRICA</p>	Dimensiones	Diámetro = 150 mm. Altura = 300mm. l/d = 2
	Tipo de Ensayo	Compresión, brasilero, peso específico y absorción, fuego, adherencia y velocidad sónica.
	Preparación	Cubrir ligeramente el interior con aceite mineral.
	Encofrado	Asegurar las bisagras. Verificar la forma y dimensiones.
	Fundición	Colocar el hormigón en 3 capas iguales, con 25 golpes por cada capa.
	Curado	Una vez almacenado por un período de hasta 48 horas en un ambiente que prevenga la pérdida de humedad, remover los especímenes de los moldes. Colocar las probetas en el tanque de almacenamiento, manteniendo todo el tiempo sus superficies con agua libre, hasta la fecha de ensayo.


Fuente: INEN. (2011). NTE INEN 1576. Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2.1.2. Viguetas

Las características de las viguetas utilizadas se presentan a continuación y se utilizan para determinar la resistencia a la flexión del hormigón con carga en los tercios:

Tabla 3.9. Viguetas

 <p style="text-align: center;">VIGUETA</p>	Dimensiones	Ancho = 150 mm. Largo = 600 mm.
	Tipo de Ensayo	Flexión
	Preparación	Cubrir ligeramente el interior con aceite mineral.
	Encofrado	Asegurar los pernos. Verificar la forma y dimensiones.
	Fundición	Colocar el hormigón en 2 capas iguales compactados con aproximadamente 75 golpes.
	Curado	Una vez almacenado por un período de hasta 48 horas en un ambiente que prevenga la pérdida de humedad, remover los especímenes de los moldes. Colocar las probetas en el tanque de almacenamiento, manteniendo todo el tiempo sus superficies con agua libre, hasta la fecha de ensayo.

Fuente: INEN. (2011). NTE INEN 1576. Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2.2. ENSAYOS EN HORMIGÓN FRESCO

3.2.2.1. Asentamiento

La consistencia se define como el estado de fluidez o plasticidad de un hormigón fresco y depende de varios factores como la cantidad de agua de amasado, granulometría y forma de los agregados, etc.; siendo el más influyente la cantidad de agua de amasado. [65]

Los métodos para establecer cuantitativamente la consistencia son el cono de Abrams, la mesa de flujo y el conisómetro de Vebe, el uso de cada método depende de la naturaleza de la mezcla y de sus componentes. Es así que para el presente estudio, el método afín es el cono de Abrams que mide la consistencia a través del control del asentamiento.

De acuerdo con lo indicado en la Norma ACI 211.1-91, “Proporcionamiento de Mezclas”, el revenimiento recomendado es de 2,5 cm a 10 cm, el mismo que será controlado con el ensayo de cono de Abrams. [1]

Tabla 3.10. Asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción

Tipos de construcción	Asentamiento (cm)	
	Máximo*	Mínimo
Muros de cimientos y zapatas.	7.5	2.5
Zapatas, cajones de cimentación y muros de subestructura sencillos.	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados.	10.0	2.5
Columnas para edificios.	10.0	2.5
Pavimentos y losas.	7.5	2.5
Concreto masivo.	7.5	2.5

FUENTE: ACI Committee 211. (1991). ACI 211.1-91. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.

Los procedimientos a seguir están estipulados en la norma INEN 1578 “Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.” [51] – ASTM C 143 “Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete.” [8]. Consiste en colocar una muestra de hormigón recién mezclado dentro de un molde húmedo con forma de un cono troncado y compactarlo con una varilla cada tercio. Levantar el molde permitiendo que el hormigón se asiente. Se mide la distancia vertical entre la altura original y la del centro desplazado de la superficie del hormigón. Este valor se reporta como el asentamiento del hormigón, como se observa en la figura.¹⁴

¹⁴ INEN. (2010). *NTE INEN 1578. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.* (Primera ed.). Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

Fotografía 3.2. Ensayo de asentamiento del hormigón



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

El promedio de todos los asentamientos obtenidos de cada mezcla de hormigón se presenta en la tabla 3.11:

Tabla 3.11. Resultados de los asentamientos de los hormigones

Tipo de Hormigón	Asentamiento (cm)
Hormigón convencional $f'c= 180 \text{ kg/cm}^2$	9.5
Hormigón convencional $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$	8.5
Hormigón PET $f'c= 180 \text{ kg/cm}^2$	9.3
Hormigón PET $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$	8.0

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

El ensayo de asentamiento o revenimiento influye directamente en la trabajabilidad del hormigón, se conoce como trabajabilidad la mayor o menor facilidad de colocación y terminado del hormigón en una determinada estructura, sin que se disgreguen sus componentes, ni se presenten vacíos y la armadura de refuerzo sea cubierta completamente por la mezcla, utilizando los medios de compactación disponibles.

3.2.2.2. Temperatura del hormigón

La temperatura en el hormigón fresco es una propiedad que influye sobre la evaporación del agua de mezclado, sobre la velocidad de hidratación del cemento, y sobre las características físicas de los agregados, como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 3.12. Influencia de la temperatura en el hormigón

Clima	Agua de mezclado	Velocidad de hidratación del cemento	Características físicas de los agregados	Recomendaciones
Cálido	Evaporación: Disminución de trabajabilidad Retemplado, provoca descenso de resistencia.	Aumenta. Acelera el fraguado. Pérdida de trabajabilidad.	Aumenta el volumen que ocupan en la mezcla.	<ul style="list-style-type: none"> - Evitar excesiva exposición al sol de los agregados. - Considerar el agua de evaporación en las dosificaciones. - Disminuir la temperatura de agua de mezclado y agregados. - Emplear aditivos plastificantes – retardantes.
Frío	Congelación: Incremento volumen. Rotura de la estructura del hormigón por las tensiones internas creadas	Disminuye. Retrasa el fraguado.	-	<ul style="list-style-type: none"> - Elevar la temperatura de agua de mezclado y agregados. - Mantener las temperaturas y humedad durante el curado. - Utilizar aditivos anticongelantes y acelerantes.

Fuente: Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Los procedimientos de ensayo están descritos en la norma ASTM C 1064 “Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic - Cement Concrete.”, consiste en tomar una muestra de hormigón fresco, colocar dentro de la muestra un termómetro con una exactitud de 0.5°C, registrar la lectura de temperatura después de un tiempo mínimo de 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice.

Los resultados obtenidos son un promedio de todos los ensayos efectuados a cada mezcla y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.13. Temperatura de los hormigones frescos

Tipo de Hormigón	Temperatura (°C)			
	I	II	III	Promedio
Hormigón convencional $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$	17.0	17.0	17.0	17.0
Hormigón convencional $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$	17.2	17.0	17.0	17.1
Hormigón PET $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$	19.9	20.0	20.3	20.1
Hormigón PET $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$	16.7	16.5	16.6	16.6

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2.2.3. Contenido de aire en el hormigón

Esta prueba determina la cantidad de aire que puede contener el hormigón recién mezclado excluyendo cualquier cantidad de aire que puedan contener las partículas de los agregados, generalmente todo concreto contiene menos de 2% en el volumen de aire. El aire existe normalmente en el concreto en forma de huecos dispersos. Tales huecos son característicos en mezclas plásticas, es decir su existencia no ocurre debido al azar y ellos pueden ser descritos como “adherencias naturales de aire” o aire adosado. El aire en el hormigón mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia del hormigón fresco a segregarse.¹⁵

El aire presente en los huecos de la mezcla de un concreto tiene origen en las siguientes causas:

- Aire original en los espacios de cemento y agregados pero después depositados en la pasta antes de endurecer.
- Aire originalmente disuelto en el agua de la mezcla.

¹⁵ Ortega García, J. (1988). *Concreto Armado I*. Piura, Perú: Impresiones Diversa Molina.

- Aire incorporado en el concreto durante los procesos de mezcla y colocación.

En el diseño de mezclas de hormigón del presente estudio se utiliza la siguiente tabla del manual ACI 211.1 “Proporcionamiento de Mezclas”, en donde se considera aproximadamente el 1% de volumen aire, de acuerdo al tamaño máximo de agregado. [1]

Tabla 3.14. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaños máximos nominales de agregado

Asentamiento (cm)	Agua, kg/cm ³ para el hormigón de agregado de tamaño nominal máximo (mm)							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Hormigón sin aire incluido								
2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15.0 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire en hormigón sin aire incluido, por ciento	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Hormigón con aire incluido								
2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
15.0 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	-
Promedio recomendado de contenido de aire total, por ciento, según el nivel de exposición.								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

FUENTE: Comité ACI 211. (1991). *Proporcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo.*

El ensayo consiste, esencialmente, en determinar la deformación elástica que presenta el hormigón fresco bajo una presión dada y en condiciones definidas, y

comparar esta deformación con la de un volumen conocido de aire sometido a la misma presión.¹⁶

Siguiendo los procedimientos de la norma ASTM C 231 “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.” [13], se utiliza un aparato que consta de un recipiente cilíndrico con tapa hermética, más unos accesorios que permiten aplicar una presión conocida y observar su efecto en el volumen de muestra introducida. El recipiente se llena en capas con el hormigón fresco, varillando según se especifica, se enrasa el recipiente y se tapa, a continuación se llena con agua el volumen de la tapa hasta purgar el líquido a través de unas válvulas, posteriormente se cierran las válvulas y se bombea aire, la presión que se levanta mueve la aguja de un indicador en la tapa del recipiente, después se libera la presión.

Fotografía 3.3. Ensayo de contenido de aire



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

¹⁶ Jiménez Montoya, P., García Mesenguer, Á., & Morán Cabré, F. (2001). *Hormigón Armado*. Barcelona, España: Gustavo Gili S.A.

Para determinar los pesos de agregados finos y gruesos que se presentarán en la muestra:

$$Fr = \frac{Vr}{Vb} \times Fb \quad (3-1)$$

$$Gr = \frac{Vr}{Vb} \times Gb \quad (3-2)$$

Donde:

Fr = Peso agregado fino en el recipiente (g)

Gr = Peso agregado grueso en el recipiente (g)

Vr = Volumen del recipiente (m³)

Vb = Volumen de dosificación (m³)

Fb = Peso del agregado fino para la dosificación (g)

Gb = Peso del agregado grueso para la dosificación (g)

Al determinar el contenido de aire de hormigón se debe considerar:

$$A_s = A_1 - G \quad (3-3)$$

Donde:

A_s = Contenido de aire en la muestra (%)

A₁ = Contenido de aire leído en el indicador y corregido (%)

G = Factor de corrección por agregados (%)

$$G = L_1 - R_1 \quad (3-4)$$

Donde:

L_1 = Lectura del manómetro

R_1 = Valor de corrección

$$R_1 = \frac{w}{W} \quad (3-5)$$

Donde:

w = Peso de agua desalojada (g)

W = Peso de agua en el recipiente del ensayo (g)

Una vez realizado los ensayos para cada tipo de hormigón, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3.15. Resultados del ensayo de contenido de aire

Tipo	Factor de corrección por agregado							Factor de expansión	Contenido de aire	
	Fr	Gr	w	W	R1	L1	G = L1 - R1	D	A1	As = A1 - G
180 CON	5738	6857	11,9	7061,1	0,17	1,2	1,0	0	2,7	1,7
180 PET	4524	6857	12,4	7061,1	0,18	1,3	1,1	0	3,0	1,9
210 CON	5383	6857	12,8	7061,1	0,18	0,8	0,6	0	2,0	1,4
210 PET	4207	6857	13,1	7061,1	0,19	1,0	0,8	0	2,4	1,6

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2.3. ENSAYOS EN HORMIGÓN ENDURECIDO (PROBETAS Y VIGAS)

El hormigón luego del tiempo final de fraguado, comienza a dar resistencia hasta endurecerse, y las propiedades del hormigón evolucionan con el tiempo, dependiendo de las características y proporciones de los materiales que lo componen y de las condiciones ambientales a que está expuesto.

En este estudio es posible determinar las siguientes propiedades del hormigón endurecido, debido a la disponibilidad del equipo en el laboratorio:

- Compresión y módulo de elasticidad.
- Flexión.
- Tracción indirecta.
- Peso específico y absorción.
- Adherencia.
- Velocidad sónica.

3.2.3.1. Ensayo de compresión

El procedimiento de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón está establecido en la norma INEN 1573 “Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.” [49] – ASTM C 39 “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens” [18], este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos de hormigón de cemento hidráulico a una velocidad que se encuentra dentro de un rango definido hasta que ocurra la falla del espécimen. La resistencia a la compresión a un espécimen

se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo para el área de la sección transversal del espécimen.

Fotografía 3.4. Ensayo de compresión



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

El valor de resistencia, que define su calidad, depende de las condiciones en que ha sido realizado, curado, ensayado, de la naturaleza del hormigón, de la geometría de los especímenes, entre otros. Las variables de mayor influencia se nombran a continuación:

3.2.3.1.1. Forma y dimensiones de la probeta utilizada para el ensayo

Si los especímenes a ensayar tiene una esbeltez superior a 2, el espécimen debe ser recortado en su altura para obtener esa relación, si por el contrario la relación es igual o menor que 1,75 pero menor a 1, el resultado de resistencia obtenido en el ensayo debe ser corregido utilizando los siguientes factores:

Tabla 3.16. Factor de corrección según la relación de longitud al diámetro del espécimen

Esbeltéz	1.75	1.50	1.25	1.00
Factor	0.98	0.96	0.93	0.87

FUENTE: INECYC. (2009). *Control de calidad en el Hormigón. Notas Técnicas*

Para relaciones diferentes a las indicadas, el factor debe obtenerse por interpolación, pero en ningún caso debe aceptarse como válido un resultado de un espécimen que tenga una relación inferior a 1.¹⁷

3.2.3.1.2. *Condiciones de ejecución del ensayo*

El ensayo deber ser ejecutado estrictamente en las condiciones establecidas en INEN 1573 “Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.” [49], de las cuales las de mayor importancia son:

- *Velocidad y continuidad en la aplicación de la carga.* Es de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s. Se debe mantener la velocidad de movimiento señalada al menos durante la última mitad de la fase de la carga esperada.
- *Estado de las superficies de aplicación de la carga de ensayo.* Con el fin de evitar fracturas prematuras por la concentración de esfuerzos en las superficies de la probetas. Si las superficies de la probeta varían respecto al plano en 0.05 mm, estas tienen que ser tratadas para conseguir planicidad y paralelismo con mortero de azufre o con almohadillas no adherentes de neopreno. [64]

¹⁷ INECYC. (2009). *Control de calidad en el Hormigón. Notas Técnicas.*

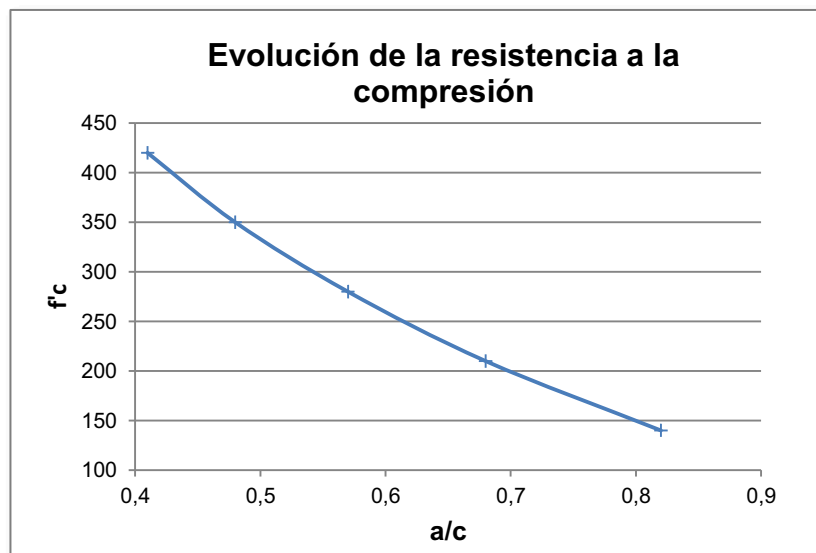
- *Centrado de la carga de ensayo.* La probeta de ensayo debe ser colocada centrada con respecto de la placa de prensa, de tal manera que no se produzcan excentricidades en la aplicación de la carga de ensayo con respecto del eje de la probeta, pues induce un momento de flexión y por ende esfuerzos de tracción que disminuyen el valor final de resistencia.[82]

3.2.3.1.3. Características del hormigón

Algunas características del hormigón condicionan de manera importante su resistencia a la compresión, tales como:

- *La relación agua/cemento.* Es el factor determinante en el valor de la resistencia de un hormigón. En el siguiente gráfico se puede apreciar como varía la resistencia a la compresión en función a la relación agua/cemento.

Figura 3.11. Evolución de la resistencia a la compresión con la relación agua-cemento



FUENTE: Comité ACI 211. (1991). Proportcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

- *Edad del hormigón.* La resistencia del hormigón aumenta con su edad en forma prácticamente indefinida, siendo el incremento mayor en etapas iniciales y disminuye a partir de los 28 días. Se puede decir prácticamente que al cabo de un año el hormigón ha alcanzado su resistencia final. Con el objetivo de establecer la calidad de un hormigón, los reglamentos exigen que se determine la resistencia a la edad de 28 días. [77]

Tabla 3.17. Relación de resistencia a compresión a diferentes edades

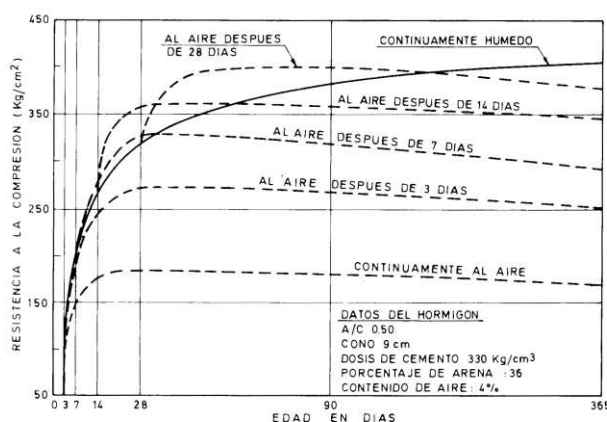
Edad (días)	3	7	28	90	360
Relación	0.40	0.65	1.00	1.20	1.35

Fuente: EHE. (1998). *Instrucción de Hormigón Estructural*. Madrid: Real Decreto 2661-1998.

3.2.3.1.4. Condiciones Ambientales

Las condiciones ambientales a las que está sometido el hormigón durante su vida útil ejerce influencia importante sobre su resistencia, a continuación se indica de tipo general la influencia de temperatura y humedad. [82]

Figura 3.12. Evolución de las resistencias a compresión con diferentes condiciones ambientales



Fuente: Zabaleta, H. (1988). *Compendio de Tecnología de Hormigón*

La gráfica anterior corresponde a experiencias realizadas por el Bureau of Reclamation, contienen algunos antecedentes que deben considerarse como referencias de carácter cualitativo. [82]

Los resultados son el promedio de tres muestras, como se indica en el Anexo 15 y se indican en la Tabla 3.18:

Tabla 3.18. Resultados del ensayo de compresión

EDAD (días)	Esfuerzo de compresión (kg/cm ²)			
	180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
7	133	134	129	187
14	165	151	173	211
28	207	180	238	231
56	213	223	274	282

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2.3.1.5. Tipos de fractura

Los tipos de fractura producidos en las probetas cilíndricas luego del ensayo de compresión, permite explicar la diferencia de resistencias entre dos probetas gemelas, pero no faculta para descartar los valores obtenidos a menos que se tenga una falla de compresión excéntrica, lo que significa que el ensayo es incorrecto [49], estos tipos se muestran a continuación:

Tabla 3.19. Modelos típicos de fractura en el hormigón

TIPOS	PROBETA	DESCRIPCIÓN
Tipo 1		Conos en ambos extremos razonablemente bien formados, fisuras a través de la cabecera menor a 25 mm.
Tipo 2		Cono bien formado en uno de los extremos, fisuras verticales que recorren a través de la cabecera, cono no muy definido en el otro extremo.
Tipo 3		Fisura vertical columnar a través de ambos extremos, conos no muy definidos
Tipo 4		Fractura diagonal sin fisuras a través de los bordes; golpear con un martillo para distinguir del Tipo 1
Tipo 5		Fracturas a los lados, en el extremo superior o en el fondo (ocurren comúnmente cuando se ensayó con neoprenos).
Tipo 6		Similar al Tipo 5, pero el extremo del cilindro está en punta

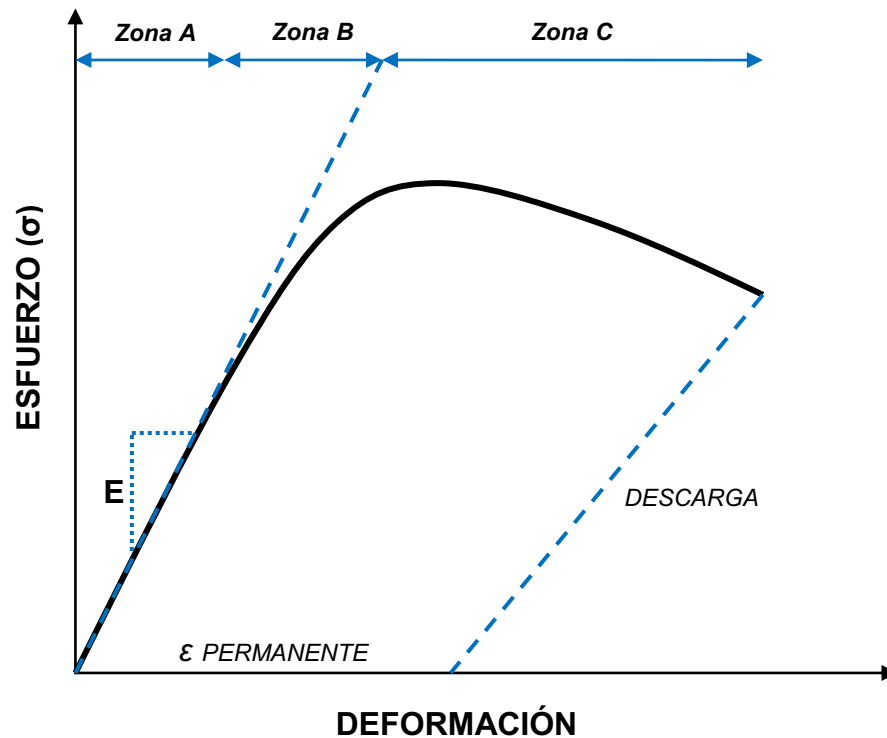
Fuente: INEN. (2010). Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico

3.2.3.1.6. Módulos de elasticidad.

El módulo de elasticidad o módulo de Young se conoce como la relación entre esfuerzo y deformación unitaria, que en materiales totalmente elásticos se considera constante e independiente del esfuerzo aplicado. Al contrario en materiales inelásticos, el módulo de elasticidad depende del valor del esfuerzo

aplicado. Lo más usual, es que los materiales presenten una combinación de ambos comportamientos, inicialmente elástico y posteriormente inelástico al aumentar el esfuerzo aplicado.

Figura 3.13. Curva típica esfuerzo-deformación del hormigón



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Así en la zona A, en el rango elástico la relación σ/ϵ es relativamente lineal lo que ocurre en niveles bajo el 40% del esfuerzo máximo, en la zona B aparecen las primeras microfisuras, normalmente en el contacto mortero-árido grueso, siendo el hormigón aún capaz de soportar esfuerzos, sus deformaciones aumentan y finalmente en la zona C, la curva cae después de alcanzar el máximo esfuerzo y los esfuerzos bajan rápidamente debido a la abertura progresiva de las microgrietas, en la pasta entre los agregados.

Cuando se aplica esfuerzos en una dirección, se producen cambios en dos dimensiones. Por lo tanto se requiere de dos parámetros para describir el

comportamiento elástico del material: el módulo de elasticidad o módulo de Young, y la relación de Poisson. El coeficiente de Poisson (μ), es la relación, entre la deformación transversal y la longitudinal correspondiente, en elementos que trabajan a compresión simple. El coeficiente de Poisson relativo a deformaciones elásticas bajo esfuerzos normales de utilización puede asumirse igual a 0.2, aunque en ciertos casos se puede despreciar el efecto de dilatación transversal. Al incrementarse los esfuerzos e iniciarse la plastificación del hormigón, el coeficiente de Poisson aumenta rápidamente hasta un valor de aproximadamente 0.5. [82]

El módulo de elasticidad se determina de acuerdo a los procedimientos descritos en la ASTM C 469 “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression” [20], en probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, los cuales son sometidos a una carga axial incrementada gradualmente hasta que el cilindro del hormigón falle. Las deformaciones transversales y longitudinales son medidas continuamente durante la aplicación de la carga.

Fotografía 3.5. Ensayo para la obtención del módulo de elasticidad



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Para la determinación del módulo de elasticidad, E_c y el coeficiente de Poisson, μ , se utiliza:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0,000050} \quad (3-6)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0,000050} \quad (3-7)$$

Donde:

E: módulo de elasticidad

σ_1 : esfuerzo correspondiente a la 50 millonésima de deformación unitaria

σ_2 : esfuerzo correspondiente al 40% de la máxima resistencia

ε_2 : deformación unitaria correspondiente a σ_2

μ : módulo de Poisson.

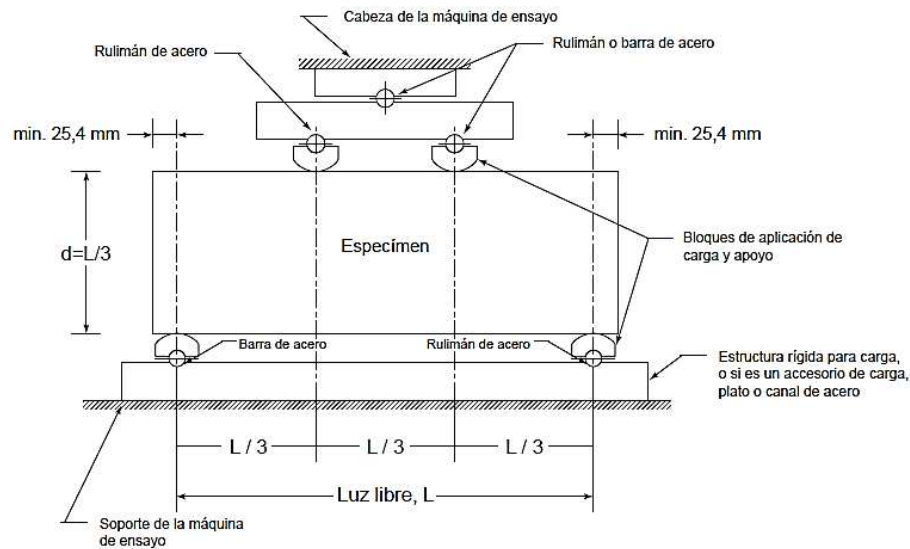
ε_{t1} : deformación unitaria transversal correspondiente al esfuerzo σ_1

ε_{t2} : deformación unitaria transversal correspondiente al esfuerzo σ_2

3.2.3.2. Ensayo a flexión

La resistencia a la flexión del concreto o módulo de rotura, se determina en forma aproximada en vigas prismáticas de hormigón simple (15 x 15 x 60) simplemente apoyadas, sujetas a dos cargas concentradas aplicadas en los tercios de la luz, siguiendo los procedimientos de la Norma INEN 2554 "Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una viga simple con carga en los tercios)." [53] - ASTM C 78 "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens." [24].

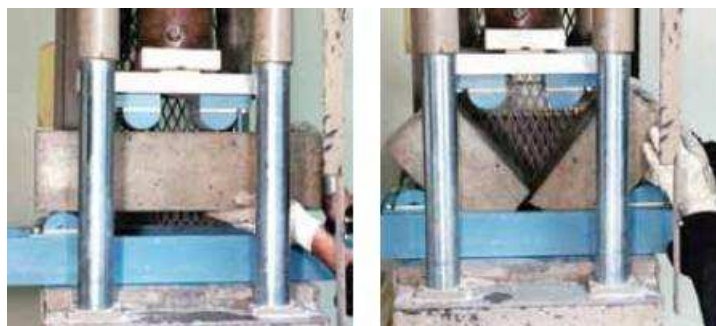
Figura 3.14. Esquema de un aparato para el ensayo a flexión



Fuente: INEN. (2011). NTE INEN 2254. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una viga simple con carga en los tercios).

La velocidad de aplicación de la carga debe ser entre 0.86 y 1.21 MPa/minuto, que para vigas de sección de 15 x 15 cm y con una separación entre apoyos igual a 45 cm, equivale a cargas entre 6.45 y 9.08 kN/minuto o 0.11 y 0.15 kN/segundo.[64]

Figura 3.15. Ensayo de Flexión del hormigón



Fuente: INECYC. (2009). Control de calidad en el Hormigón.

3.2.3.2.1. *Módulo de Rotura*

El Módulo de Rotura se obtiene del ensayo de flexión y sus expresiones para ser determinado están en la Norma INEN 2554 “Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una viga simple con carga en los tercios).” [53] - ASTM C 78 “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.” [24].

Si la falla se produce en el tercio medio se calcula como indica la siguiente expresión:

$$MR = \frac{PL}{bd^2} \quad (3-8)$$

Si la falla ocurre fuera del tercio medio pero no está separada de él por más de una longitud equivalente a 5% de la luz libre, el módulo de rotura debe ser calculado así:

$$MR = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (3-9)$$

Donde:

MR = Módulo de rotura

P = Carga máxima aplicada

L = Luz libre entre apoyos

b = Ancho de la viga

d = Altura de la viga

a = Distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, medido a lo largo del eje longitudinal de la cara inferior de la viga

Si la falla ocurre por fuera del tercio medio y está separada de él por más de una longitud equivalente a 5% de la luz libre, el resultado del ensayo es desechado.

El ACI 318 Sec 9.5 sugiere la adopción del siguiente valor promedio:

$$MR = 2\sqrt{f'c} \quad (3-10)$$

La resistencia a la tracción del concreto sometido a flexión (módulo de rotura) es una propiedad más variable que la resistencia a la compresión, y es aproximadamente de 10 a 15% de la resistencia a la compresión.¹⁸

Los resultados que se muestran a continuación son un promedio de tres muestras, como se indica en el Anexo 16:

Tabla 3.20. Módulos de rotura a los 28 días, en kg/cm²

	180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
Módulo de rotura (kg/cm ²)	29,15	24,38	34,12	31,58

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

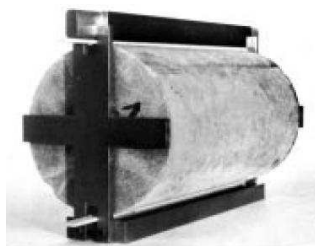
3.2.3.3. Ensayo indirecto de tracción (brasileño)

La resistencia a tracción del hormigón es muy difícil determinar directamente en probetas por la dificultad de agarre de las mismas, debido que al aplicar esfuerzos de tracción se involucran otros esfuerzos, como el de la compresión al sujetarlas [41].

¹⁸ ACI 318. (2008). *ACI 318-08. Requisitos del reglamento para concreto estructural*. Estados Unidos: American Concrete Institute.

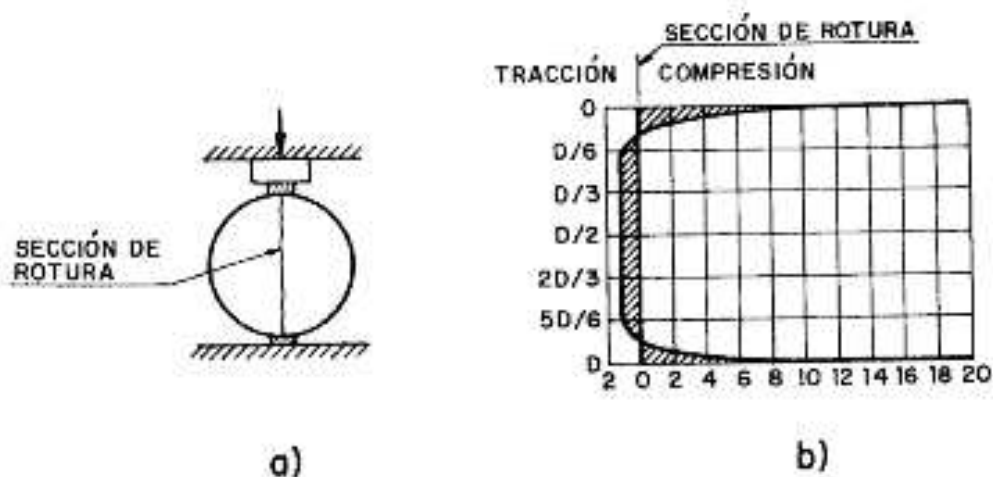
Es así que se usa el método brasilero o de tracción indirecta, el que básicamente consiste en someter a probetas normalizadas a una carga lineal de compresión aplicada a lo largo del cilindro en dos ejes longitudinales opuestos, el procedimiento de ensayo y las expresiones para encontrar las resistencias se encuentra en la norma ASTM C 496 "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens." [21].

Figura 3.16. Ensayo de tracción



FUENTE: ASTM. (2011). ASTM C 496 - 11. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

Figura 3.17. Ensayo brasilero - Distribución de esfuerzos muy parecida a la de tracción pura



Fuente: Jiménez Montoya, P., García Mesenguer, Á., & Morán Cabré, F. (2001). Hormigón Armado

La resistencia a la tracción indirecta se calcula como:

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3-11)$$

Donde:

f_t = Resistencia a la tracción indirecta

P = Carga máxima aplicada

L = Longitud del cilindro

D = Diámetro del cilindro

El resultado presentado de los ensayos de tracción indirecto es un promedio de tres muestras por cada edad, y se puede observar en el Anexo 17:

Tabla 3.21. Resultados de los ensayos de tracción indirecta

EDAD	Esfuerzo de Tracción Indirecta (kg/cm ²).			
	180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
7 días	15,5	16,3	21,5	20,5
14 días	20,1	16,4	22,0	21,3
28 días	22,0	20,0	22,9	23,6

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2.3.4. Ensayo de peso específico y absorción

La densidad o peso específico del hormigón endurecido depende de muchos factores, principalmente de la naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación empleado. Será mayor cuanto mayor sea la de los áridos utilizados y mayor cantidad de árido grueso contenga, y mayor cuanto mejor compactado esté. [65]

El procedimiento de ensayo a seguir está estipulado en la Norma ASTM C 642 “Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete.” [23] y los resultados obtenidos, promedio de tres pruebas, son los siguientes y se muestran en el Anexo 18:

Tabla 3.22. Resultados de ensayo de peso específico y absorción de los hormigones

TIPO HORMIGÓN	PESO ESPECÍFICO (g/cm ³)	PESO ESPECÍFICO S.S.S (g/cm ³)	ABSORCIÓN DE AGUA (%)
180 CON	2,021	2,244	11,020
180 PET	1,955	2,163	10,633
210 CON	2,030	2,247	10,688
210 PET	2,018	2,218	9,977

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2.3.5. Ensayo de resistencia al fuego

El hormigón tiene buenas propiedades de resistencia al fuego, es así que puede tener un comportamiento satisfactorio y sin emitir gases durante un tiempo relativamente alto. En un incendio es fácil alcanzar los 600°C a los 10 minutos de iniciado y los 1.200°C a los 20 minutos.

El cemento Portland sometido a temperaturas presenta un coeficiente de dilatación negativo a medida que aumenta su temperatura; pero al enfriarse se contraen debido a la deshidratación, razón por la cual las estructuras después de un incendio presentan una apariencia normal mientras están calientes, pero al enfriarse pierden la cohesión.

Si bien es cierto que la resistencia del hormigón armado depende del refuerzo de acero y éste se funde de 1300 a 1400°C, el hormigón sufre una importante reducción de resistencia a los 500 °C.

El fuego fomenta grietas en juntas y sitios mal compactados y en los planos del acero de refuerzo, al quedar expuesto el refuerzo conduce el calor y lo acelera, entonces se puede decir que el comportamiento del hormigón frente al fuego es directamente proporcional al espesor del recubrimiento del hormigón armado. [41]

El procedimiento de resistencia al fuego se establece en la norma ASTM E 119 "Fire Tests of Building Construction and Materials." [27], sin embargo al no disponer de la capacidad operativa para seguir los protocolos, el presente estudio propone un procedimiento de exposición a fuego, que consiste en someter a probetas cilíndricas de 15cm de diámetro y 30 cm de altura a propano incinerado, controlando la temperatura de la superficie de los especímenes, para posteriormente someterlos a compresión, y poder comparar la resistencia con la de elementos de la misma edad fabricados en la misma mezcla pero que no fueron sometidos a fuego.

Tabla 3.23. Acción de las altas temperaturas sobre el hormigón

Temperatura	Efecto sobre el hormigón¹⁹	Efecto sobre los componentes del hormigón²⁰
< 100 °C	Ninguna influencia	Ninguna influencia
100 °C a 150 °C	El hormigón cede su agua capilar y de absorción	Deshidratación del cemento
150 °C durante un tiempo bastante largo	Ligera disminución de la resistencia a compresión y fuerte caída de la resistencia a tracción	
Hasta 250 °C en periodos cortos	Disminución de la resistencia a tracción afectando mínimo a la de compresión	Deshidratación del aluminato tricálcico y la cal hidratada
300 °C a 500 °C	Pérdida de un 50% de la resistencia a compresión, la de tracción puede haber desaparecido	
500 °C a 900 °C	La cal hidratada se destruye por pérdida del agua de cristalización (agua combinada químicamente)	Dilatación de agregados basálticos
900 °C a 1000 °C	La deshidratación es total y provoca la destrucción completa del hormigón	Dilatación de arcillas expansivas. Los agregados calcáreos se descomponen produciendo gas carbónico

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

¹⁹ Jiménez Montoya, Pedro, Álvaro García Mesenguer y Francisco Morán Cabré. Hormigón Armado. Barcelona: Gustavo Gili S.A., 2001.

²⁰ Gutiérrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

Si bien las temperaturas son menores que las de la norma ASTM E 119 “Fire Tests of Building Construction and Materials.” [27], el propósito del estudio es simular el efecto de un incendio doméstico, en el que el combustible culpable de los siniestros es el gas propano de uso doméstico, razón por la cual se eligió propano como fuente de calor.

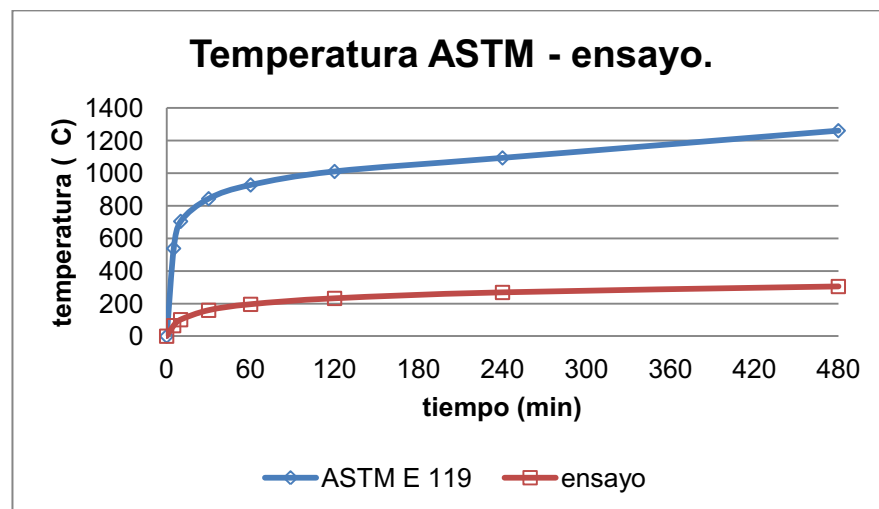
Tabla 3.24. Temperatura de ensayo

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	
	ASTM E 119	Ensayo
0	0	0
5	538	65
10	704	101
30	843	159
60	927	195
120	1010	232
240	1093	268
480	1260	305

Fuente: ASTM. (2000). *ASTM E 119 - 00. Fire Tests of Building Construction and Materials.*

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 3.18. Temperatura de ensayo



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Fotografía 3.6. Exposición a propano incinerado de las probetas



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Fotografía 3.7. Control de temperatura durante el ensayo



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Fotografía 3.8. Ensayo de compresión de hormigón convencional sometido a fuego



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Fotografía 3.9. Ensayo de compresión de hormigón PET sometido a fuego



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Del procedimiento antes descrito se obtienen los siguientes resultados, que son un promedio de tres ensayos, como se muestra en el Anexo19:

Tabla 3.25. Resistencia a compresión luego del fuego

Esfuerzo de compresión después de someter a fuego (kg/cm ²).			
180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
169	151	236	183

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2.3.6. Ensayo de adherencia

La adherencia o resistencia al deslizamiento tiene su origen en los fenómenos siguientes: [39]

- ✓ Adhesión de naturaleza química entre el acero y el hormigón.
- ✓ Fricción entre la barra y el hormigón, que se desarrolla al tender a deslizar la primera.
- ✓ Apoyo directo de las corrugaciones de las barras sobre el hormigón que las rodea.

El ensayo consiste en extraer una barra previamente embebida en una probeta de hormigón, y determinar el esfuerzo producido a lo largo de toda la barra.

Para resolver el problema del esfuerzo de adherencia se considera un esfuerzo uniforme promedio, u , a lo largo de toda la barra, equivalente a la variación real. Partiendo de consideraciones de equilibrio se tiene la siguiente expresión:

$$\text{—————} \quad (3-12)$$

Donde:

d_b = diámetro de la barra

L_{des} = longitud de la barra que penetra en el concreto

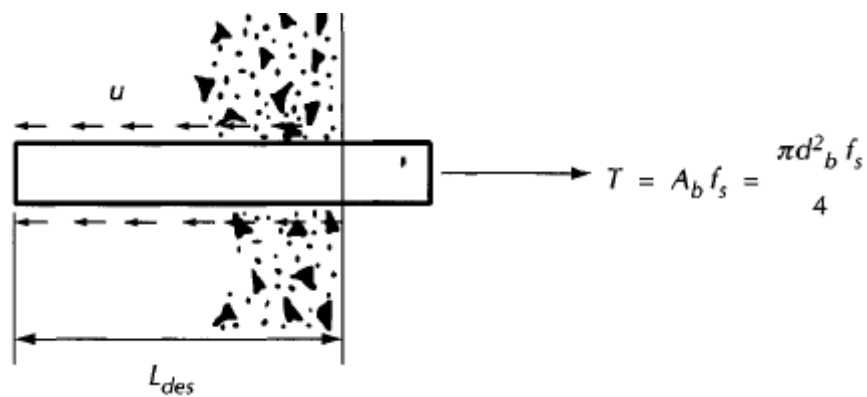
f_s = esfuerzo a desarrollar en el acero

u = esfuerzo de adherencia promedio

Despejando u resulta:

$$\text{---} \quad (3-13)$$

Figura 3.19. Adherencia en anclaje.



FUENTE: González Cuevas, Ó., & Robles Fernández-Villegas, F. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*.

Fotografía 3.10. Probeta para ensayo de adherencia

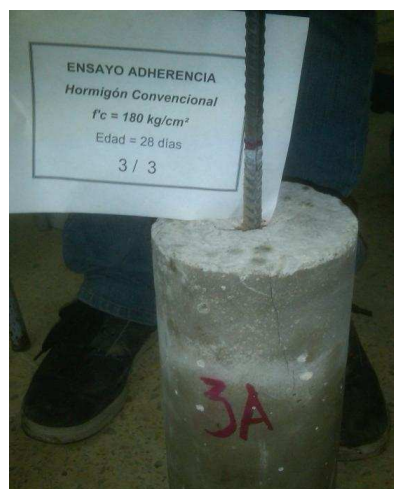


Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Los resultados del ensayo de extracción de barras embebidas en probetas de hormigón son los siguientes:

Tabla 3.26. Cálculos ensayos de ensayos de adherencia

Nº	Descripción	db (cm)	ld (cm)	F (T)	As (cm ²)	fs (kg/cm ²)	μ (kg/cm ²)
1	Hormigón Convencional f _c = 180 kg/cm ²	1,2	22,1	2,095	1,13	1852,39	25,15
2	Hormigón Convencional f _c = 180 kg/cm ²	1,2	20	2,528	1,13	2235,24	33,53
3	Hormigón Convencional f _c = 180 kg/cm ²	1,2	23,7	2,25	1,13	1989,44	25,18
1	Hormigón Convencional f _c = 210 kg/cm ²	1,2	23,5	3,816	1,13	3374,08	43,07
2	Hormigón Convencional f _c = 210 kg/cm ²	1,2	21,6	2,536	1,13	2242,32	31,14
3	Hormigón Convencional f _c = 210 kg/cm ²	1,2	27	3,044	1,13	2691,49	29,91
1	Hormigón PET f _c = 180 kg/cm ²	1,2	24,1	3,079	1,13	2722,43	33,89
2	Hormigón PET f _c = 180 kg/cm ²	1,2	23,3	3,346	1,13	2958,51	38,09
3	Hormigón PET f _c = 180 kg/cm ²	1,2	24,4	3,108	1,13	2748,08	33,79
1	Hormigón PET f _c = 210 kg/cm ²	1,2	21,5	3,514	1,13	3107,06	43,35
2	Hormigón PET f _c = 210 kg/cm ²	1,2	21,4	3,717	1,13	3286,55	46,07
3	Hormigón PET f _c = 210 kg/cm ²	1,2	22,6	3,664	1,13	3239,69	43,00

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Tabla 3.27. Resultados de los ensayos de adherencia

Esfuerzo de adherencia (kg/cm ²)			
180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
27,95	35,26	34,71	44,14

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

3.2.3.7. Ensayo de velocidad sónica

El método consiste en evaluar la resistencia del hormigón, la facilidad con que un pulso ultrasónico longitudinal lo atraviesa, la facilidad de propagación es función de la densidad la cual a su vez se correlaciona directamente con su resistencia.

El procedimiento de ensayo se encuentra en la norma ASTM D 2845 “Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.” [25], el equipo, dotado de dos palpadores, determina eléctricamente el tiempo que tarda el pulso en recorrer el espacio entre los dos palpadores. Si se conoce el espacio entre palpadores por medición directa, se puede medir la velocidad de propagación.

Fotografía 3.11. Equipo para ensayo de velocidad de pulso ultrasónico



Foto: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Los factores que afectan la velocidad del pulso ultrasónico son los siguientes: [41]

- Precisión de la medida de longitud.
- Tipo, cantidad y tamaño máximo del agregado.
- Contenido de aire en la mezcla.

- Rugosidad superficial.
- Edad del hormigón.
- Relación agregado – cemento.

Tabla 3.28. Calidad de los hormigones con cementos portland

Velocidad (m/s)	Calidad del hormigón
>4500	Excelente
3600 – 4500	Bueno
3000 – 3600	Aceptable
2100 – 3000	Malo
< 2100	Muy Malo

FUENTE: Jiménez Montoya, P., García Mesenguer, Á., & Morán Cabré, F. (2001). *Hormigón Armado*.

Los resultados de los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico promedio de tres muestras como se muestra en el Anexo 20, son:

Tabla 3.29. Resultados ensayo de velocidad sónica

Velocidad Sónica (m/s)			
180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
3754	3305	3744	3293

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

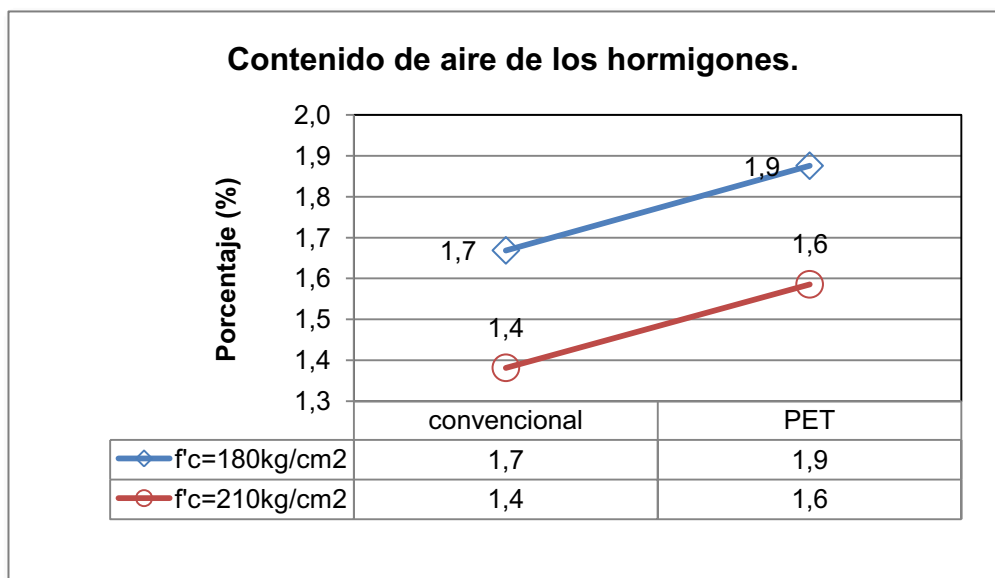
4.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Se realiza un análisis de las propiedades físicas como contenido de aire, peso específico, absorción, temperatura y trabajabilidad en el hormigón convencional y en el hormigón PET, con el objetivo de mostrar los efectos producidos al utilizar botellas reciclables trituradas como agregado en el hormigón.

4.1.1. CONTENIDO DE AIRE

En la siguiente figura se presentan los contenidos de aire obtenidos de los cuatro tipos de mezclas elaboradas:

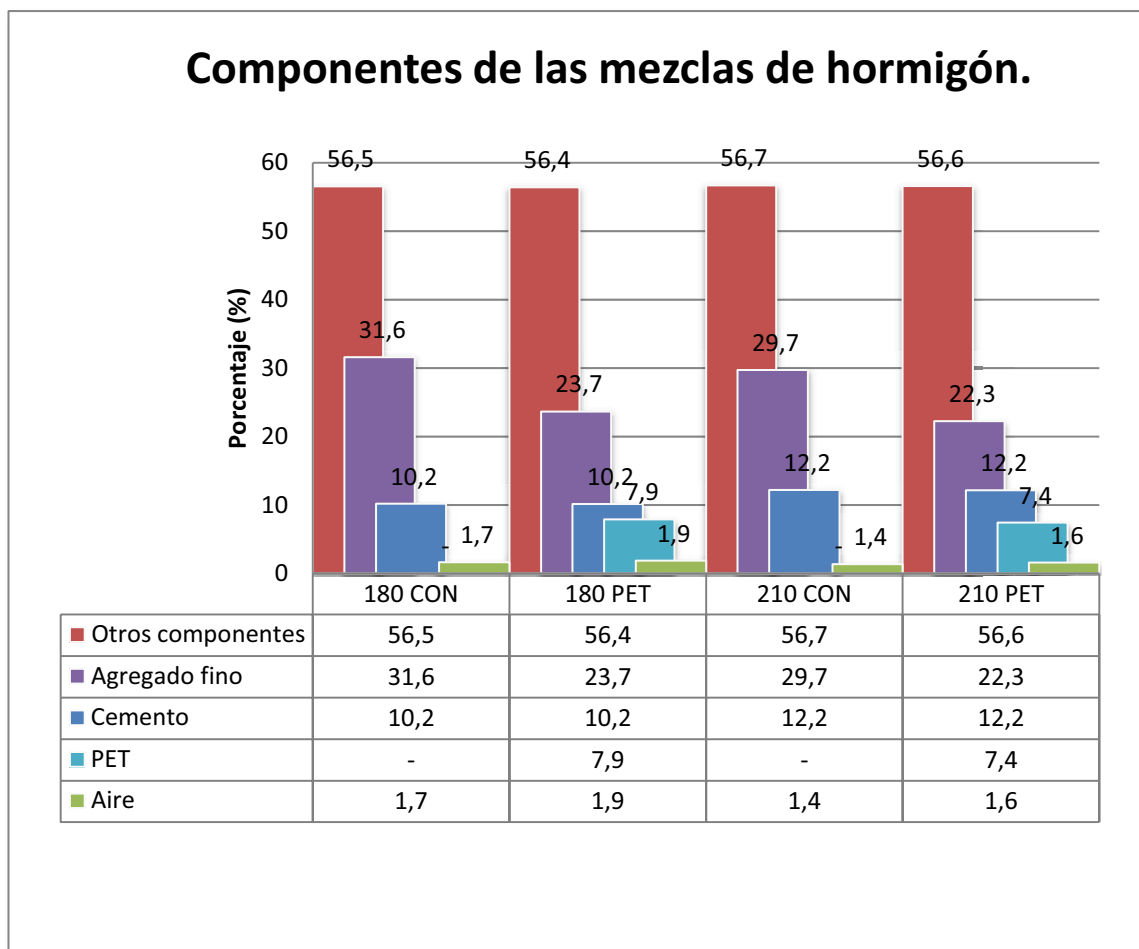
Figura 4.1. Contenido de aire de los hormigones



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

De la gráfica anterior, se observa que todas las mezclas tuvieron contenidos de aire normales entre, el 1.4, y 1.9 %, y los hormigones PET presentan un contenido de aire ligeramente mayor.

Figura 4.2. Componentes de las mezclas



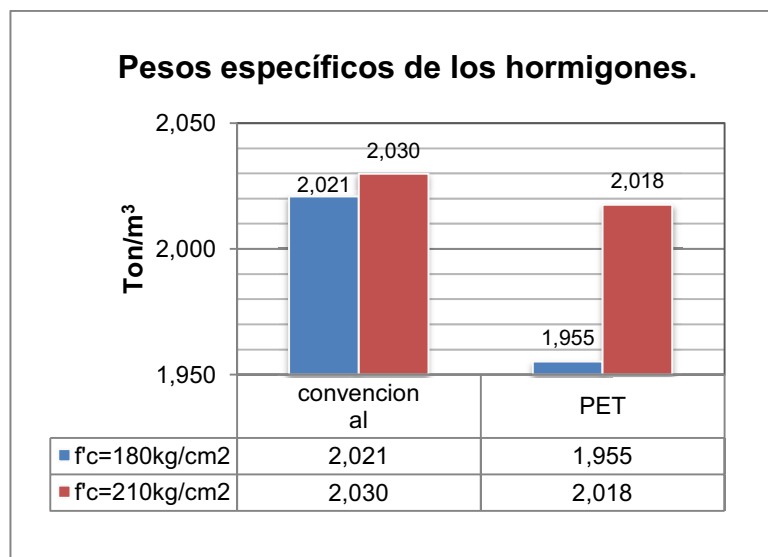
Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Como se aprecia de los gráficos anteriores, de las cuatro mezclas, el hormigón PET de $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$ tienen mayor contenido de aire, ya que este hormigón PET tiene menor cantidad de cemento y mayor cantidad de PET, que son los factores que intervienen directamente en la cantidad de aire atrapado.

4.1.2. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN

El peso específico determinado en los cuatro hormigones permitirá determinar la calidad de la composición granulométrica y el grado de compacidad del hormigón, siendo un ensayo muy importante para control del hormigón.

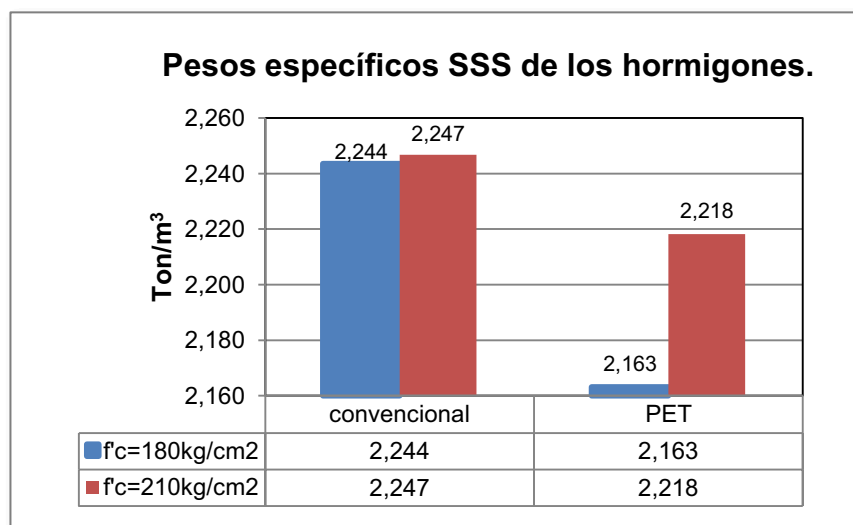
Figura 4.3. Resultados del ensayo de peso específico



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

La figura anterior muestra que la reducción del peso específico de hormigón convencional al hormigón PET, en el hormigón $f'c= 210\text{kg/cm}^2$ es de aproximadamente 0.6%, mientras que en el de $f'c= 180\text{kg/cm}^2$ llega al 3.27%. En el hormigón PET $f'c= 180\text{kg/cm}^2$ existe mayor disminución ya que es el hormigón con mayor reemplazo de arena por PET, siendo el PET, el material de menor peso específico que todos los componentes del hormigón.

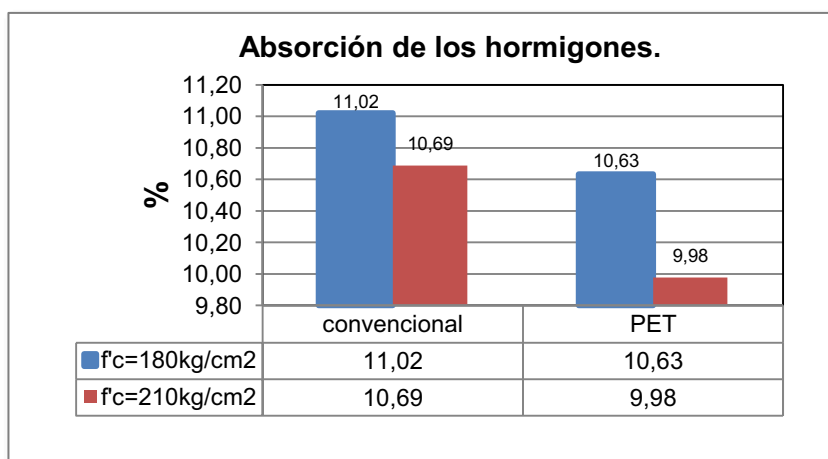
Figura 4.4. Resultados del ensayo de peso específico SSS



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

La reducción del peso específico SSS de hormigón convencional al hormigón PET, en el de $f'c= 210\text{kg/cm}^2$ es de aproximadamente 1.29%, mientras que en el de $f'c= 180\text{kg/cm}^2$ llega al 3.61%.

Figura 4.5. Resultados del ensayo de absorción



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

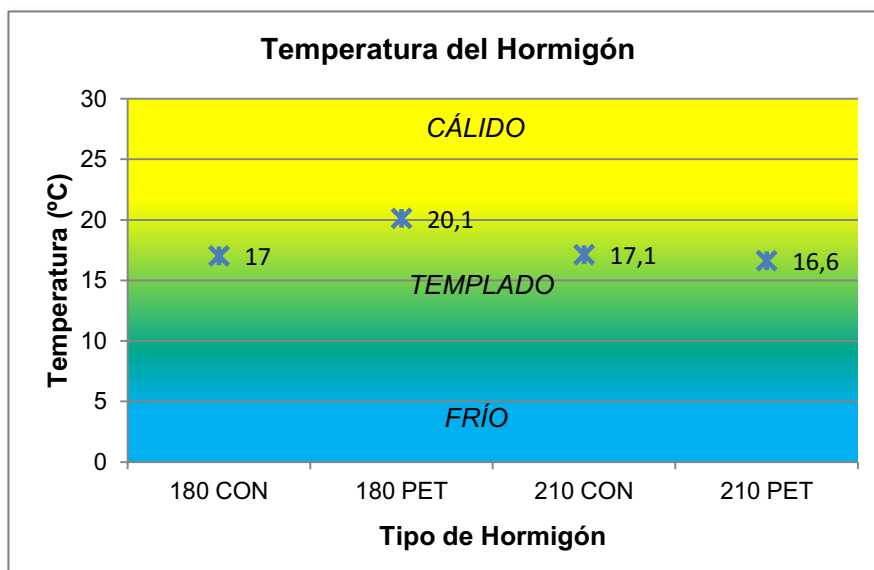
En la figura anterior se puede observar que la absorción también sufre un descenso en el hormigón PET, siendo en el de $f'c= 210\text{ kg/cm}^2$ de 3.54%,

mientras que en el de $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$ de 6.64%, ya que el PET es un material con una absorción del 0,1%.

4.1.3. TEMPERATURA

La temperatura del hormigón fresco depende directamente del clima de la temperatura ambiente, las fundiciones de las probetas y vigas se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos de la Escuela Politécnica Nacional, ubicado en la ciudad de Quito, esta ciudad tiene un clima templado, con temperaturas que van desde los 10 a los 22 °C.²¹ Dichas temperaturas no aceleran ni retrasan el proceso de fraguado, y durante todo el proceso de curado la temperatura a la que se mantienen las probetas y vigas en la cámara de curado es de 5°C, por lo tanto los esfuerzos no se alteran por acción de la temperatura.

Figura 4.6. Resultados del ensayo de temperatura



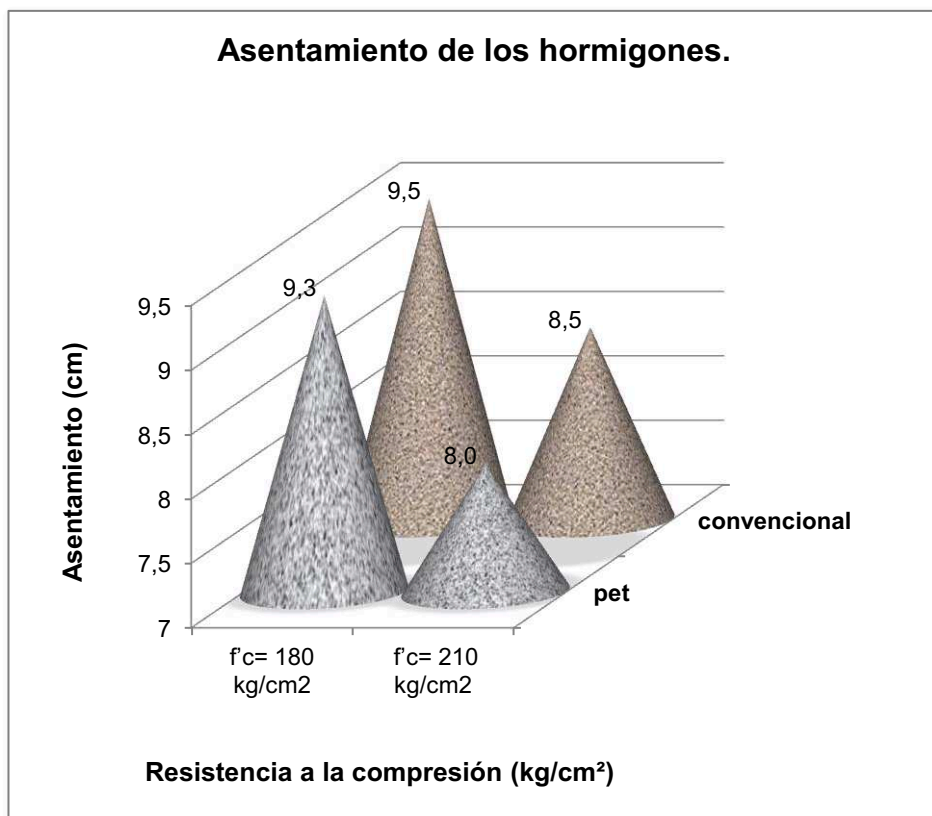
Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

²¹ Porrou, P. (1983). *Los climas del Ecuador - Fundamentos explicativos*. Quito: ORSTOM-PRONAREG.

4.1.4. TRABAJABILIDAD

Previo a la realización de los ensayos de revenimiento en los hormigones PET de $f'c=180\text{kg/cm}^2$ y $f'c=210\text{kg/cm}^2$, la mezcla da la impresión visual de exceso de agua, y aparenta sobrepasar los límites recomendados. Al contrario de lo esperado, los resultados de asentamiento no difieren más del 6% de los hormigones convencionales, como muestra la siguiente figura:

Figura 4.7. Resultados de los ensayos de asentamiento



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Tabla 4.1. Clasificación de las consistencias según los asentamientos medidos con el cono de Abrams

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO (cm)	EJEMPLO DE TIPO DE CONSTRUCCIÓN	SISTEMA DE COLOCACIÓN	SISTEMA DE COMPACTACIÓN
Muy seca	-	Prefabricación de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; hormigón de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	2 a 3.5	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi-seca	3.5 a 5	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple o con refuerzo simple	Con máquinas operadas manualmente	Vibración mecánica
Media	5 a 10	Pavimentos, losas, muros, vigas y secciones medianamente reforzadas	Colocación manual	Vibración mecánica
Húmeda	10 a 15	Elementos estructurales esbeltos y secciones bastante reforzadas	Bombeo	Vibración mecánica
Muy húmeda	15 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Bombeo, tubo – embudo, tremie	Normalmente no adecuados para vibrarse

Fuente: INECYC. (2007). El Manual de Pepe Hormigón. Quito: Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto

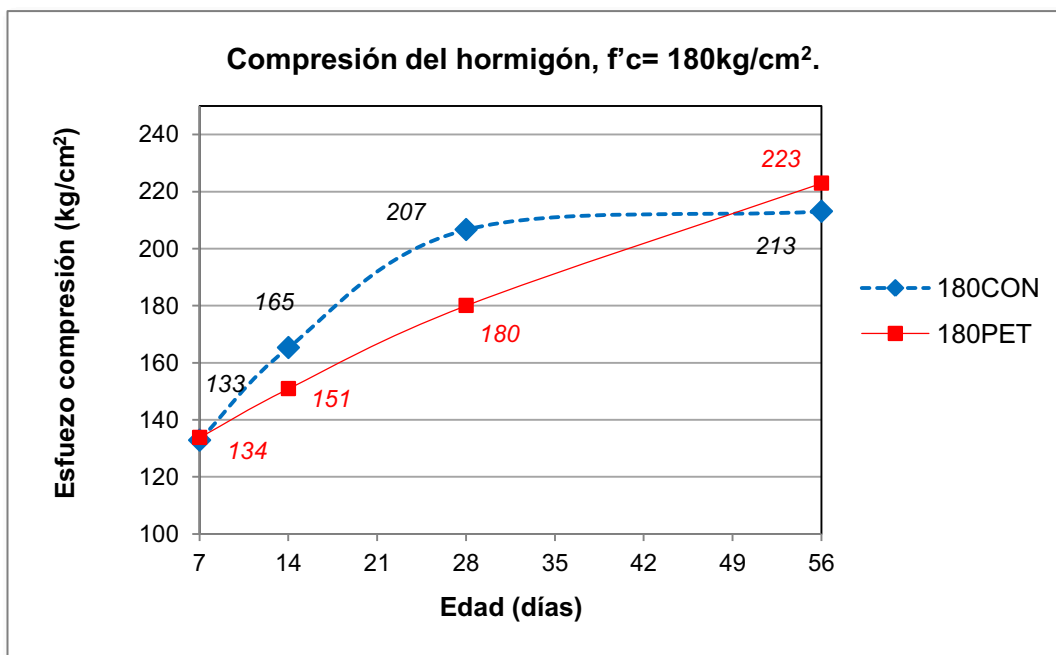
De los resultados obtenidos, se puede señalar que los hormigones de este estudio presentan una consistencia media, trabajabilidad alta, de fácil colocación manual, el sistema de compactación puede ser mecánico o manual, se emplea este tipo de hormigones para construcciones de elementos y secciones medianamente reforzados, y además los valores del revenimiento están dentro de los requerimientos del ACI 211.1-91 "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.", empleado para el diseño de mezclas.

4.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

4.2.1. COMPRESIÓN

Al realizar el ensayo de compresión, se obtienen los valores que se indican en las siguientes figuras para $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ respectivamente.

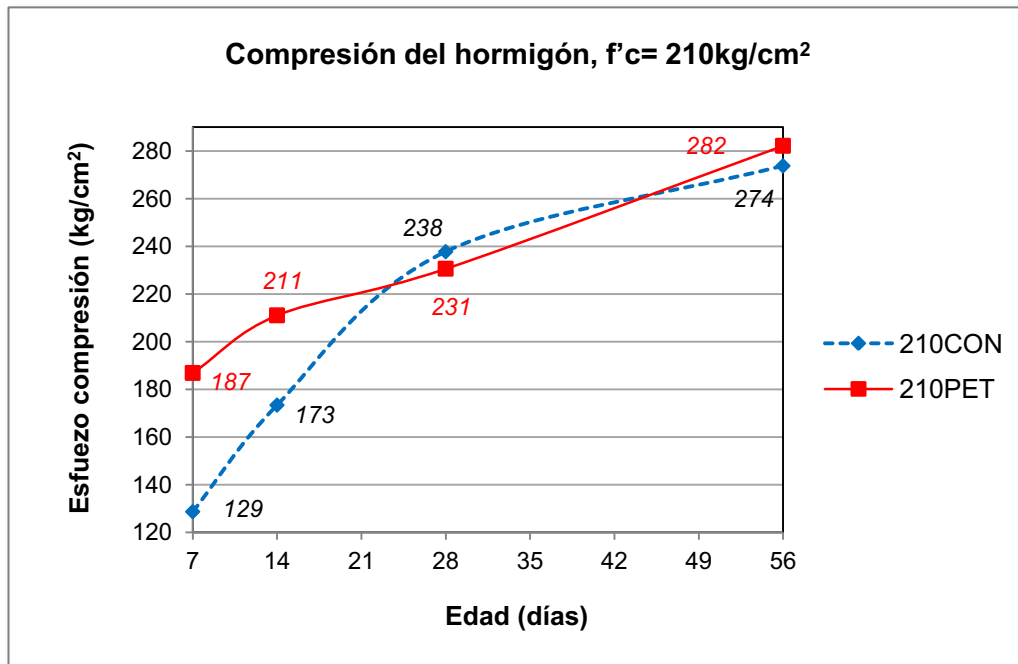
Figura 4.8. Esfuerzos de compresión para hormigones $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

En la figura anterior se puede apreciar que la resistencia del hormigón PET es ligeramente superior, alrededor de un 1% del hormigón convencional a los 7 días, mientras tanto a los 14 y 28 días la resistencia del hormigón convencional es superior entre (9% y el 13%) respectivamente; a medida que transcurre el tiempo el hormigón PET muestra un comportamiento diferente al convencional por lo que su resistencia a los 56 días es superior en un 9,6% al del hormigón convencional patrón.

Figura 4.9. Esfuerzo de compresión para hormigones $f'c= 210\text{kg/cm}^2$



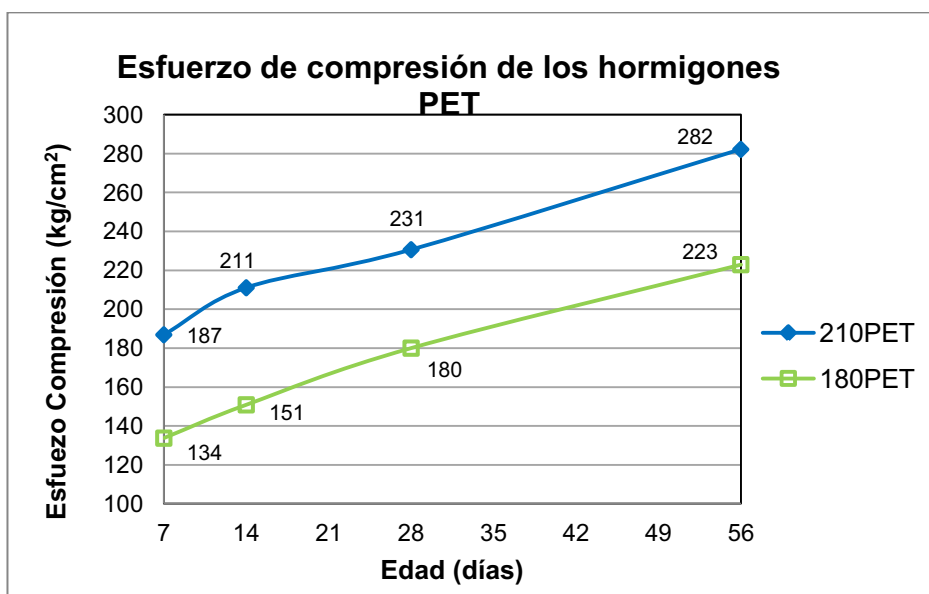
Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

El comportamiento es similar en hormigones $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, pero los porcentajes de diferencia varían; así, la resistencia del hormigón PET, superior entre el 31% y 18%, con relación al hormigón convencional a los 7 y 14 días respectivamente, a los 28 días la resistencia del hormigón convencional es superior en un 3% y a los 56 días nuevamente el hormigón PET tiene una resistencia superior en un 3% debido a su comportamiento diferente al del hormigón patrón.

En general las resistencias de los hormigones PET a los 28 días son menores a los hormigones convencionales, pero están dentro del rango de requerimiento.

A continuación se muestra la gráfica de los esfuerzos de compresión de acuerdo a su edad de los hormigones PET:

Figura 4.10. Esfuerzos de compresión para hormigones PET



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Para poder comparar los resultados de todos los ensayos de compresión se tipificó dicha variable dividiendo la resistencia a compresión a diferentes edades por el valor de la resistencia a compresión a los 28 días.

(4-1)

De donde se tiene:

Tabla 4.2. Porcentajes de la resistencia de compresión

Porcentajes de la resistencia de compresión					
TIPO	f'_c (kg/cm ²)	7 días	14 días	28 días	56 días
Literatura		65	85	100	112
Convencional	180	64	80	100	103
PET	180	74	84	100	124
Convencional	210	54	73	100	115
PET	210	81	91	100	122

Fuente: NTE INEN 1573. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico., 2010.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

4.2.2. TRACCIÓN INDIRECTA

La formación y propagación de las grietas, en el lado de tracción de elementos de hormigón armado sometidos a flexión, dependen principalmente de la resistencia a la tracción.

En la siguiente tabla se observa los valores de resistencia a tracción para los diferentes tipos de hormigones, y los porcentajes de disminución de dicha resistencia.

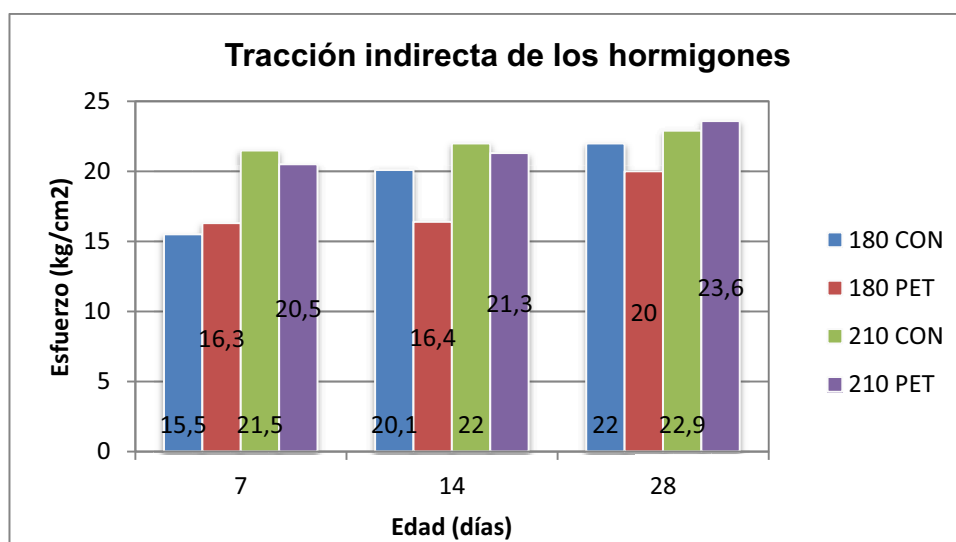
Tabla 4.3. Tracción Indirecta de los hormigones

EDAD (días)	Esfuerzo de Tracción Indirecta (kg/cm ²).					
	f'c = 180 kg/cm ²			f'c = 210 kg/cm ²		
	Convencional	PET	% Reducción	Convencional	PET	% Reducción
7	15,5	16,3	6,5*	21,5	20,5	4,7
14	20,1	16,4	18,4	22,0	21,3	3,2
28	22,0	20,0	9,1	22,9	23,6	3,1*

* Valor que presenta incremento en el valor del esfuerzo a tracción del hormigón.

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 4.11. Tracción indirecta de los hormigones



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

La resistencia a la tracción indirecta disminuye mientras mayor sea el contenido de polietileno tereftalato PET en todos los casos, excepto en el hormigón PET de $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$ a los 7 días y en el hormigón PET de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ donde se observa un incremento de 6,5% y del 3,1% respectivamente, valores que se recomiendan ser confirmados, con una cantidad mayor de muestras ya que el incremento posiblemente se deba a que el número de ensayos no sea representativo.

Para poder comparar los resultados de todos los ensayos de tracción indirecta se tipificó dicha variable dividiendo la resistencia a tracción a los 28 días por el valor de la resistencia a compresión a los 28 días.

— (4-2)

Tabla 4.4. Porcentajes de resistencia a la tracción indirecta a los 28 días

	180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
Tracción indirecta (kg/cm ²)	10,65	11,09	9,64	10,23

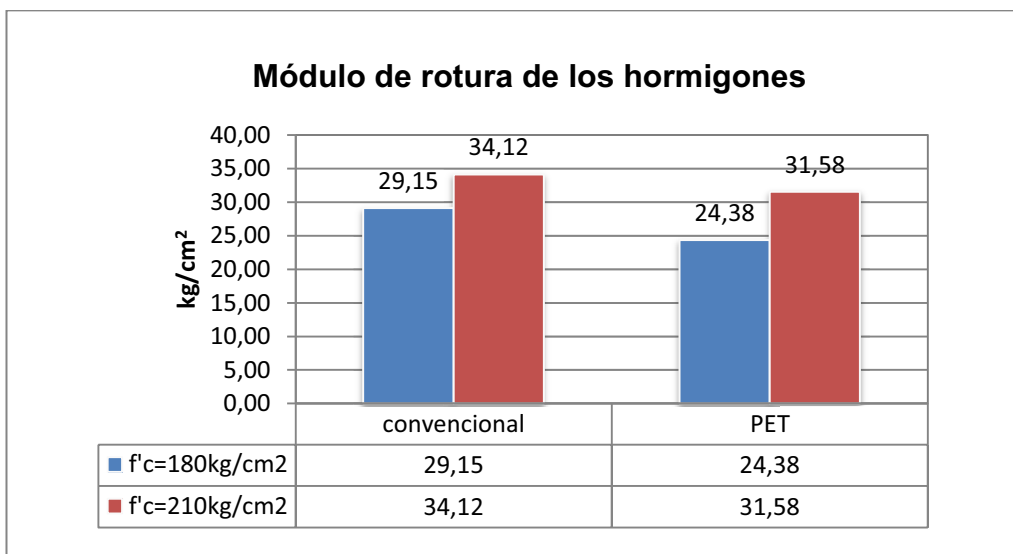
Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Se obtiene que la resistencia de tensión indirecta es alrededor de un 10% del esfuerzo de compresión.

4.2.3. FLEXIÓN.

Muchos investigadores expresan que el ensayo a flexión es el mejor método para obtener la resistencia del hormigón a flexión. [38] [78]

Figura 4.12. Módulo de Rotura a los 28 días



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

De los resultados presentados en la figura anterior se observa que el módulo de rotura decrece en los dos casos debido a la inclusión de polietileno tereftalato PET en el hormigón, siendo la disminución mayor para el hormigón PET de $f'c=180\text{kg/cm}^2$.

Para poder comparar los resultados de todos los ensayos de flexión se tipificó dicha variable dividiendo la resistencia a flexión (MR) a los 28 días por el valor de la resistencia a compresión a los 28 días.

$$\text{porcentaje de resistencia para flexión} = \frac{MR}{f'c} \times 100 \quad (4-2)$$

Tabla 4.5. Porcentajes de la resistencia a flexión de los hormigones

180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
14,11 %	13,54 %	14,35 %	17,54 %

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

De la tabla anterior se puede apreciar que el módulo de rotura corresponde al 13% del esfuerzo de compresión para un hormigón PET de $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$, y al 17% del esfuerzo de compresión para un hormigón PET de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Mostrando un comportamiento similar al hormigón convencional donde el módulo de rotura está entre el 10% al 20%. [33]

Además se aprecia que el esfuerzo a flexión obtenido con el método del tercio medio es alrededor de un 25% mayor que el esfuerzo obtenido del ensayo de tracción indirecta.

4.2.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD.

De acuerdo al procedimiento de la norma ASTM C 469 “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression” [20] se obtienen los siguientes resultados para los diferentes hormigones, como se muestra en el Anexo 21:

Tabla 4.6. Resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson

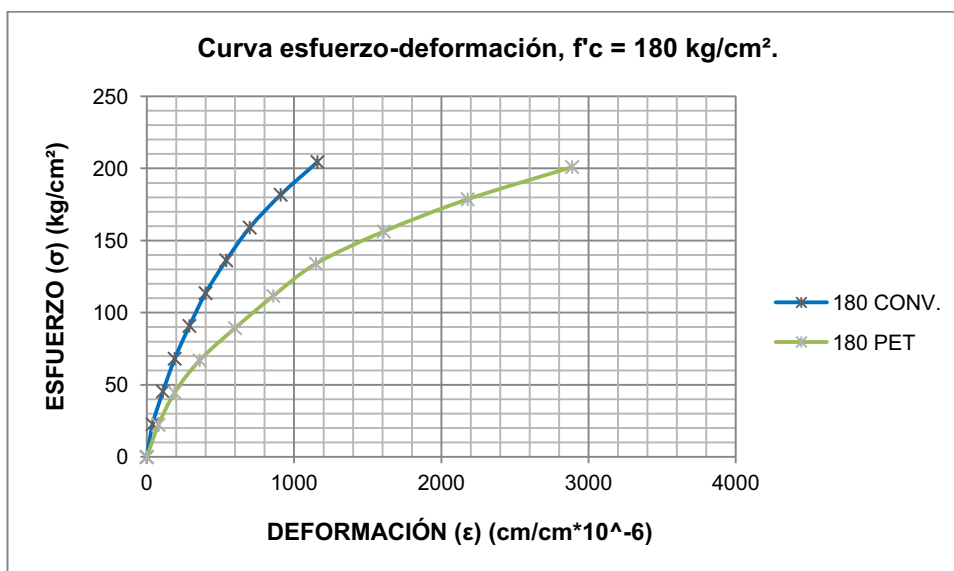
	Tipos de hormigón			
	180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
E (kg/cm²)	18,57	10,95	21,90	15,65
μ	0,183	0,115	0,200	0,143

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

A continuación se muestra las gráficas esfuerzo – deformación para los hormigones convencionales y PET, como se puede observar, no se pudo evaluar la forma de la curvatura pasado el esfuerzo máximo, dada la imposibilidad de hacerlo con este método de ensayo ASTM C 469. [20]

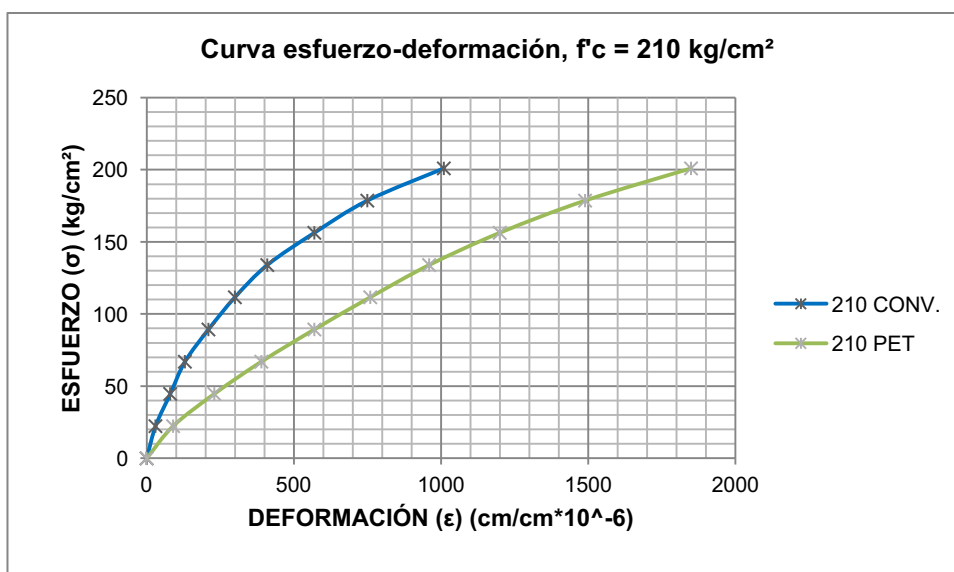
Las curvas esfuerzo-deformación unitaria obtenidas, muestran que a mayores resistencias se tiene una línea más inclinada en referencia al eje de deformación unitaria, que obedece a un rango elástico más amplio, indicando que el hormigón se hace más dúctil con la inclusión del Polietileno de Tereftalato PET.

Figura 4.13. Esfuerzo – deformación, $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 4.14. Esfuerzo – deformación, $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Los hormigones PET tienen mayor capacidad de deformación que los hormigones convencionales, lo que indica un menor módulo de elasticidad, pero se debe considerar que el comportamiento del hormigón PET no tiene marcado las tres zonas antes expuestas en la Figura 3.13, es decir no presenta un tramo lineal en el que se puede definir claramente el módulo de Young.

4.2.5. RESISTENCIA AL FUEGO

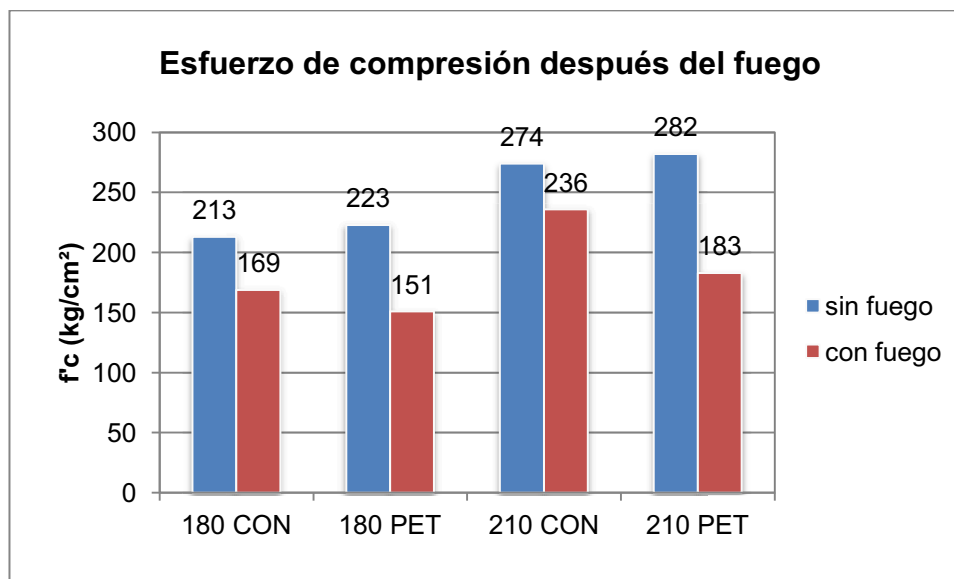
Después de haber expuesto a las probetas cilíndricas de hormigón a fuego por un lapso de 4 horas, simulando un incendio, las probetas son ensayadas a compresión, a fin de determinar la influencia del fuego en la propiedad más significativa del hormigón como es el esfuerzo de compresión. El tiempo de incineración es adoptado arbitrariamente, ya que como muestra la Tabla 3.43, el incremento de temperatura luego de este lapso no es significativo. A continuación se muestra los resultados obtenidos y además el porcentaje de pérdida de dicho esfuerzo para cada uno de los hormigones.

Tabla 4.7. Resultados de ensayo de fuego

	Resistencia a la Compresión			
	180 CON	180 PET	210 CON	210 PET
sin fuego	213	223	274	282
con fuego	169	151	236	183
%pérdida	21	32	24	35

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 4.15. Resistencia a la compresión después del fuego



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

La figura 4.15 muestra la disminución de la resistencia a compresión hasta el 24% en hormigones convencionales y en hormigones PET hasta un 35%. Se debe notar que el ensayo de compresión se realizó luego de 10 minutos de la exposición al fuego de las probetas. Lo acotado anteriormente indica que la inclusión de PET en el hormigón afecta en la resistencia a compresión cuando es sometido a altas temperaturas.

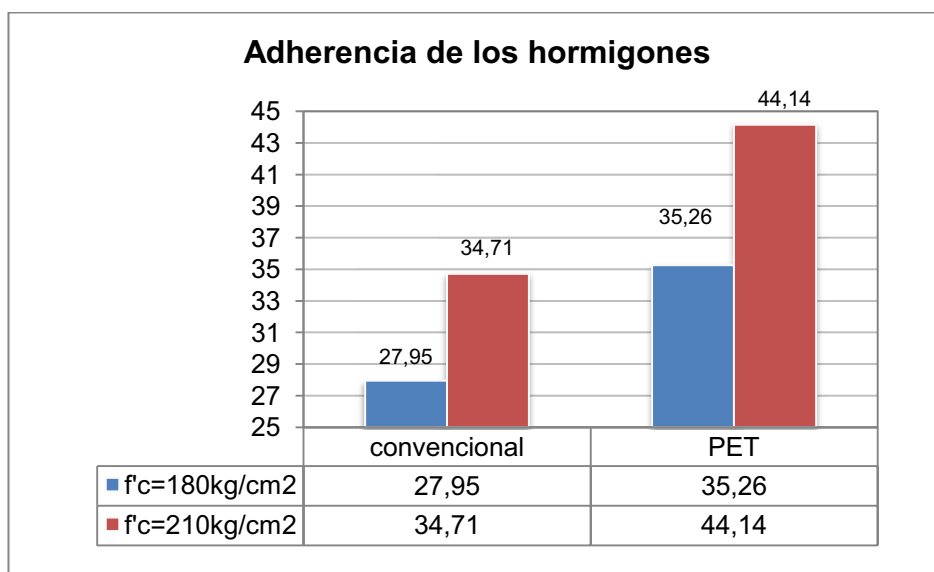
4.2.6. ADHERENCIA

Este ensayo de adherencia da una idea clara del concepto de anclaje; el esfuerzo desarrollado al extraer la barra de acero del macizo de hormigón aumentó en los hormigones PET y en los hormigones se muestran a continuación, además se muestra los porcentajes de variación.

Tabla 4.8. Adherencia de los hormigones

TIPO	Esfuerzo de adherencia (kg/cm ²)	% Variación
180 CON	27,95	100
180 PET	35,26	126
210 CON	34,71	100
210 PET	44,14	127

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 4.16. Resultados del ensayo de adherencia

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Como muestra la Figura 4.16 la adherencia del hormigón PET para $f'c = 180\text{kg/cm}^2$ y para $f'c = 210\text{kg/cm}^2$, aumenta alrededor de 26% y 27% respectivamente, respecto de los hormigones convencionales, esto se debe a geometría y textura del PET incluido como agregado en el PET.

4.2.7. VELOCIDAD SÓNICA

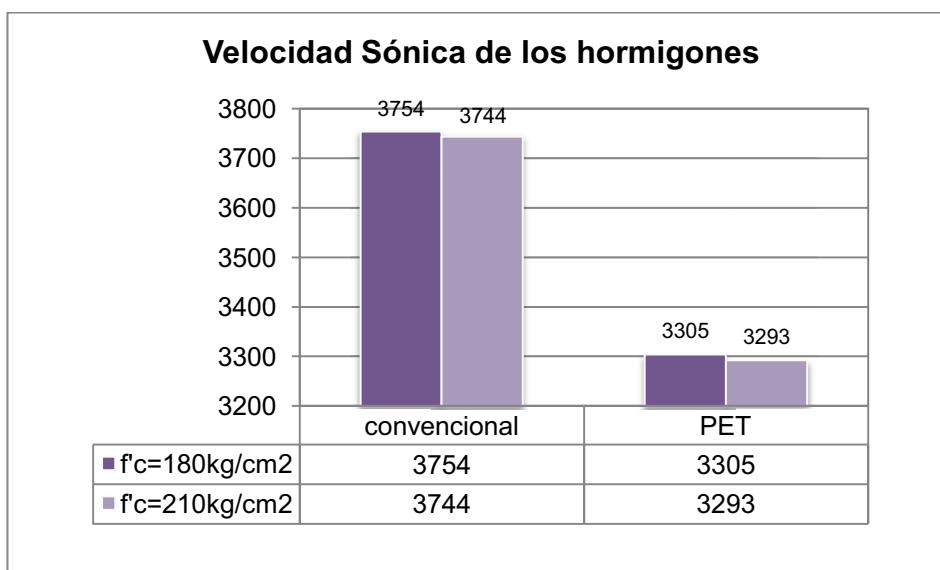
Para conocer el interior del hormigón y de sus componentes según la trayectoria de la propagación de las ondas sonoras, a continuación se muestran los resultados obtenidos de velocidad sónica, así como los porcentajes de disminución:

Tabla 4.9. Velocidad sónica de los hormigones

TIPO	Velocidad Sónica (m/s)	% Variación
180 CON	3754	100
180 PET	3305	88
210 CON	3744	100
210 PET	3293	88

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Figura 4.17. Resultados de ensayo de velocidad de pulso ultrasónico



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Como se observa en la siguiente figura el valor de la velocidad sónica en el hormigón se reduce en un 12% en el hormigón PET, debido al aumento de espacios vacíos generados por el uso del polietileno tereftalato (PET).

A pesar de que la reducción es significativa todos los hormigones están dentro del rango aceptable.

4.3. ANÁLISIS ECONÓMICO

Las partes que comprenden un proyecto son las siguientes:

- Estudio de Mercado
- Estudio Técnico
- Estudio Administrativo
- Estudio Financiero
- Evaluación Económica

El presente trabajo analiza únicamente dos de ellas, el estudio técnico previamente considerado que son los beneficios e inconvenientes del hormigón PET frente al hormigón convencional y el estudio o evaluación económica, en el que se pretende establecer la factibilidad económica de emprender una empresa que produzca el hormigón PET para lo cual se realiza el siguiente análisis, con las siguientes variables:

- Inversión total o monto original de la inversión.
- Vida útil del proyecto.
- Valor de rescate al final de la vida útil del proyecto.
- Costo de capital o Tasa mínima requerida.

4.3.1. INVERSIÓN TOTAL O MONTO ORIGINAL DE LA INVERSIÓN.

Para poder conocer la inversión total, es decir los recursos necesarios del proyecto, se determina en primer lugar el costo de los materiales obligatorios en un metro cúbico de hormigón. Ya que en el presente estudio se compararon hormigones de distintas resistencias a compresión, el análisis de precios unitarios realizado para conocer cuál es el costo de un hormigón convencional de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$, que como es lógico será más costoso que el de $f'c= 180 \text{ kg/cm}^2$, con el fin de simplificar el análisis y así tenemos, se tiene:

Tabla 4.10. Análisis de precios unitarios

DESCRIPCIÓN	COSTO (USD)
Equipo	6,66
Mano de Obra	51,92
Material	60,92
Transporte	6,78
TOTAL	126,28

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Como se observa en la tabla anterior el costo de los materiales es de \$ $60.92/\text{m}^3$.

De la observación en la planta de reciclaje artesanal del Colegio Fernando Ortiz Crespo, el cual proporcionó el PET triturado para ésta investigación se encuentra que el rendimiento de un obrero para lavar y triturar botellas de PET es de $1.2 \text{ m}^3/\text{día}$ de PET triturado suelto, en el estudio se considera cinco obreros que producirán una cantidad de 2.34 ton/día , que potencialmente podrían formar parte de 39.2 m^3 de hormigón PET.

Por otra parte se ve necesario la inversión en dos camiones mixer con una capacidad de 6 m^3 para el transporte del hormigón PET, que además harían tres descargas en los sitios, dando así un total de $36 \text{ m}^3/\text{día}$ de hormigón transportado y colocado.

Con lo indicado anteriormente, se suponen los siguientes gastos:

Tabla 4.11. Resumen de gastos

GASTOS	
INVERSIÓN	
TERRENO	Área de 1 ha donde se van a localizar las instalaciones operativas y administrativas
EDIFICIO	Localidad destinada a oficinas administrativas
CAMIÓN MIXER	Maquinaria transportadora del hormigón
PLANTA DE HORMIGÓN	Maquinaria elaboradora del hormigón
TRITURADORAS	Maquinaria trituradora de botellas de PET
MENSUALES	
FIJOS	
MANO DE OBRA PARA PET	Obreros encargados de la recolección, limpieza y trituración de las botellas de PET
MANO DE OBRA PARA HORMIGÓN	Obreros encargados del abastecimiento de material a los mixer
CHOFERES MIXER	Personal que operara los camiones transportadores de hormigón
MATERIALES	Cemento, agua y agregados (hormigón simple)
VARIABLES	
ENERGÍA DE PLANTA HORMIGÓN	Energía necesaria para el funcionamiento de la planta de hormigón
ENERGÍA TRITURADORAS	Energía necesaria para el funcionamiento de las máquinas trituradoras
COMBUSTIBLE DE MIXER	Combustible necesario para el transporte del hormigón en los camiones mixer
DEPRECIACIÓN	
EDIFICIO	Depreciado en 20 años
CAMIÓN MIXER	Depreciado en 5 años
PLANTA DE HORMIGÓN	Depreciado en 10 años
TRITURADORAS	Depreciado en 5 años

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Por otra parte los ingresos generados serían los producidos por la venta de hormigón PET y el valor residual que se generaría al evitar la disposición final en el relleno.

Tabla 4.12. Resumen de ingresos

INGRESOS	
PRODUCCIÓN HORMIGÓN	Hormigón PET producido en la planta, transportado y colocado
VALOR RESIDUAL	Costo evitado, al evitar la disposición de los desechos en los rellenos sanitarios, costo de recolección de residuos sólidos

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

4.3.2. VIDA ÚTIL Y VALOR DE RESCATE

Se conoce como vida útil al tiempo durante el cual se estima que el proyecto generará beneficio, y es considerado en el horizonte de planeación del proyecto. En el presente estudio se considera que el proyecto tendrá una vida útil de diez años.

El valor de rescate es conocido también como valor residual o de recuperación, es el monto de efectivo a recuperar por la inversión al final de la vida útil del proyecto. En este proyecto es de 99,03 millones de dólares obtenidos en un lapso de 10 años.

Para poder cuantificar y tener un mejor panorama de lo que se ha analizado hasta ahora, se realiza un análisis de costos de un mes de producción, considerando además la inversión inicial necesaria. Los costos son aproximados debido a la amplia gama de equipo disponible, pero siempre considerando un factor de seguridad, manteniendo cierta cautela en la estimación de los costos. Con lo que se tiene lo siguiente.

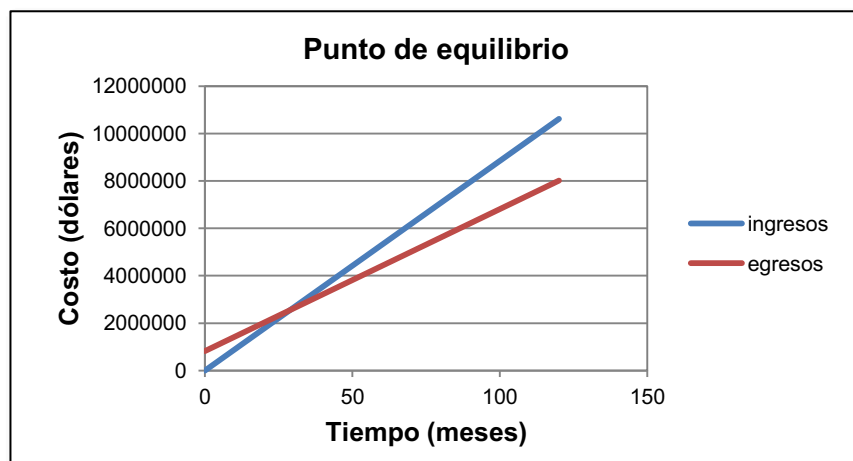
Tabla 4.13. Resumen de flujo de caja

Descripción	COSTO (USD)
Inversión	820.000,00
Costos mensuales	59.946,00
Ingresos mensuales	88.549,00

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

Para conocer la situación financiera del proyecto se realiza el análisis de punto de equilibrio con lo que se tiene que a partir del segundo año y cuarto mes, el proyecto tendría ganancia.

Tabla 4.14. Punto de equilibrio



Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

4.3.3. TASA MÍNIMA REQUERIDA

Es la tasa de ganancia anual que solicita ganar el inversionista para llevar a cabo el proyecto. Si bien se obtiene ganancia a partir del segundo trimestre del segundo año de iniciado el proyecto, se debe saber si la inversión es rentable haciendo la comparación con la tasa mínima requerida que en este estudio se considera como la tasa de interés pasiva.

Si bien se obtiene ganancia a partir del segundo trimestre del segundo año de iniciado el proyecto, se debe saber si la inversión es rentable haciendo la comparación con el interés que obtendría el capital en una entidad bancaria.

Realizando el estudio de la producción anual durante 10 años para conocer la rentabilidad de la inversión en el proyecto se tiene la siguiente tabla que muestra,

que, a partir del séptimo año de producción se tendría una rentabilidad del 8% que es superior a la que ofrecen las entidades bancarias que es de 4.53%²².

Tabla 4.15. Resumen de inversión

AÑO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INGRESOS x10⁶	6,91	20,72	32,41	45,16	57,91	70,66	83,41	96,16	108,92	121,67
GASTOS x10⁶	15,34	24,69	34,04	43,39	52,74	57,68	66,31	74,94	83,57	92,21
TASA RETORNO (ANUAL)	-55%	-16%	-5%	4%	10%	23%	26%	28%	30%	32%
INGRESOS ACUMULADOS x10⁶	6,91	27,63	60,04	105,20	163,11	233,77	317,18	413,35	522,26	643,93
GASTOS ACUMULADOS x10⁶	15,34	40,02	74,06	117,45	170,19	227,87	294,18	369,12	452,70	544,90
TASA RETORNO ACUMULADA	-55%	-31%	-19%	-10%	-4%	3%	8%	12%	15%	18%

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

²² Banco Central del Ecuador, tasas de interés, <http://www.bce.fin.ec/docs.php?path=documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indice.htm>

4.4. CUADROS COMPARATIVOS

Tabla 4.16. Resumen de las propiedades del hormigón PET y hormigón convencional

PROPIEDADES	UNIDAD	NORMA		Tipo de Hormigón						Hormigón PET vs hormigón convencional	
		INEN	ASTM	f'c = 180 kg/cm ²		f'c = 210 kg/cm ²		Ventaja	Desventaja		
				Convencional	PET	Convencional	PET				
Asentamiento o revenimiento	cm	1578	C 143	9,5	9,3	8,5	8,0	x			
Temperatura del hormigón	°C	-	C 1064	17,0	20,1	17,1	16,6				
Contenido de aire	%	-	C 231	1,7	1,9	1,4	1,6	x			
Esfuerzo de compresión	kg/cm ²	1573	C 95	207,0	180,0	238,0	231,0	x			
Módulo de elasticidad	kg/cm ²	-	C 469	18,6	11,0	21,9	15,7		x		
Módulo de rotura	kg/cm ²	2554	C 78	29,2	24,4	34,1	31,6		x		
Tracción indirecta	kg/cm ²	-	C 496	22,0	20,0	22,9	23,6				
Peso específico	g/cm ³	-	C 642	2,021	1,955	2,030	2,018	x			
Absorción	%	-	C 642	11,0	10,6	10,7	10,0	x			
Esfuerzo del fuego	kg/cm ²	1573	C 95	169,0	151,0	236,0	183,0		x		
Ensayo de adherencia	kg/cm ²	-	-	28,0	35,3	34,7	44,1	x			
Ensayo de velocidad sónica	m/s	-	D 2845	3754	3305	3744	3293	x			

Elaborado: Adriana Lema y Jonathan Chacón

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Los hormigones PET obtenidos pueden ser fabricados y colocados manualmente con menor esfuerzo que los hormigones convencionales ya que la energía para mover cierto volumen de arena siempre será mayor que la empleada para el mismo volumen de plástico, es decir la trabajabilidad del hormigón PET, se ve afectada favorablemente con la introducción del PET.
- El proceso de fundición se realiza en un ambiente controlado, por lo cual las propiedades del hormigón fresco, tiempos de fraguado y trabajabilidad, no se alteran.
- Durante el tiempo de curado, todas las probetas y vigas se mantienen a una temperatura constante de 5°C, por lo que se descarta la influencia de la temperatura en los análisis de esfuerzos.
- La mala granulometría del PET remplazado en las dosificaciones de los hormigones, modifica la granulometría del agregado fino que es el responsable de llenar el espacio entre las partículas, provocando un aumento en la cantidad de aire en la mezcla fresca.
- Al remplazar hasta un 25% de volumen de agregado fino con PET, no se observa una disminución considerable en la resistencia a la compresión y el contenido de aire sufre un ligero incremento alrededor de 10.5% y 12.5%, en el hormigón de $f'c= 180\text{kg/cm}^2$ y el de $f'c= 210\text{kg/cm}^2$ respectivamente.
- Cuando la consistencia y la graduación de los agregados se mantienen constantes, el contenido de aire aumentará si se disminuye la cantidad de cemento y agregados finos que forman la mezcla.

- La resistencia a compresión a los 28 días en los hormigones PET disminuye un 13% en el hormigón de $f'c= 180 \text{ kg/cm}^2$ y en el de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ un 3% con respecto a los convencionales, manteniendo en ambos la misma relación agua-cemento. Este comportamiento varía a los 56 días, donde la resistencia a compresión de los hormigones PET es mayor en 9.6% y 3% que la de los hormigones convencionales, en el hormigón de $f'c= 180 \text{ kg/cm}^2$ y en el de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ respectivamente.
- Para el diseño de hormigones PET de resistencia a la compresión $f'c= 180 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$, se utiliza el método Proporcionamiento de mezclas del ACI 211 de hormigones convencionales, siempre y cuando el remplazo del agregado fino no sea mayor al 25%.
- En el hormigón PET, el módulo de rotura es alrededor del 10% al 20% y la resistencia a la tracción indirecta es cerca del 20% de la resistencia a la compresión, similar al comportamiento que tiene el hormigón convencional.
- La disminución de peso específico y peso específico SSS en el hormigón PET es provocado por el reemplazo de un material con menor peso específico que un agregado pétreo. El hormigón de $f'c= 180 \text{ kg/cm}^2$ sufre reducciones mayores que el de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ ya que el primero contiene una mayor cantidad de agregado fino que involucra una mayor cantidad de PET reemplazado.
- La absorción del hormigón PET, se reduce debido a que el polietileno tereftalato incorporado tiene una absorción casi nula, al contrario del agregado fino reemplazado.
- Luego de ser sometido a altas temperaturas, la reducción de resistencia a compresión en hormigón PET es mayor que en la de hormigón convencional, debido al mal comportamiento que tiene el PET.
- La geometría del agregado PET, induce una mayor fuerza de fricción pues posee un área de contacto más extensa que la del agregado fino,

provocando en el hormigón PET un crecimiento de aproximadamente 26.5% en el esfuerzo de adherencia por anclaje.

- La velocidad de pulso ultrasónico se reduce en 12% en los hormigones PET de las dos resistencias estudiadas, ratificando la reducción de densidad, pero sin afectar significativamente las propiedades mecánicas.
- Al fabricar un metro cúbico de hormigones PET de resistencias a compresión de $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, se encapsularía 63.64 kg y 59.70 kg de polietileno de tereftalato triturado, respectivamente.

5.2. RECOMENDACIONES

- Existe variación en la resistencia a la tracción indirecta o brasilero, se observa dos picos de aumento de dicha resistencia para diferentes edades, por lo que se podría recomendar realizar el ensayo brasilero con un mayor número de probetas, a fin de confirmar este comportamiento.
- Las gráficas esfuerzo - deformación de los hormigones PET muestran un comportamiento diferente a la de los hormigones convencionales, por lo que se recomienda hacer un estudio más profundo sobre la metodología y procedimientos a seguir para la obtención de los módulos de elasticidad para este tipo de hormigones PET.
- El estudio económico no pretende establecer con exactitud los costos involucrados en el emprendimiento de una empresa que provea de hormigón PET, es un análisis que tiene el objetivo de demostrar a groso modo que es factible y rentable invertir en una empresa de este tipo. Es menester del empresario realizar un análisis financiero más profundo, capaz de satisfacer toda incertidumbre.
- Se recomienda realizar investigaciones complementarias donde se estudie el comportamiento de hormigones con resistencias a compresión mayores a $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y con la incorporación de acero de refuerzo.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACI Committee 211. (1991). American Concrete Institute 211.1-91. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. ACI.
2. American Society for Testing and Materials. (2011). ASTM C 1064 - 11. Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic - Cement Concrete. Philadelphia.: ASTM.
3. American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM C 1157 - 10. Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. Philadelphia: ASTM.
4. American Society for Testing and Materials. (2007). ASTM C 127 - 07. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. Philadelphia: ASTM.
5. American Society for Testing and Materials. (2007). ASTM C 128 - 07a. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. Philadelphia: ASTM.
6. American Society for Testing and Materials. (2006). ASTM C 131 - 06. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. Philadelphia: ASTM.
7. American Society for Testing and Materials. (2006). ASTM C 136-06. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. (Primera ed.). Philadelphia: ASTM.

8. American Society for Testing and Materials. (2008). ASTM C 143 - 08. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. Philadelphia: ASTM.
9. American Society for Testing and Materials. (2005). ASTM C 1602M - 05. Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. Philadelphia: ASTM.
10. American Society for Testing and Materials. (2004). ASTM C 187 - 04. Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement. Philadelphia: ASTM.
11. American Society for Testing and Materials. (2003). ASTM C 188 - 03. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. Philadelphia: ASTM.
12. American Society for Testing and Materials. (2007). ASTM C 191 - 07. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. Philadelphia: ASTM.
13. American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM C 231 - 10. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. Philadelphia: ASTM.
14. American Society for Testing and Materials. (2009). ASTM C 29 - 09. Standard Test Method for Bulk Density("Unit Weight") and Voids in Aggregate. Philadelphia: ASTM.
15. American Society for Testing and Materials. (2006). ASTM C 305 - 06. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Philadelphia: ASTM.
16. American Society for Testing and Materials. (2009). ASTM C 31 - 09. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the field. Philadelphia: ASTM.

17. American Society for Testing and Materials. (2008). ASTM C 33 - 08. Standard Specification for Concrete Aggregates. Philadelphia: ASTM.
18. American Society for Testing and Materials. (2005). ASTM C 39 - 05. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia: ASTM.
19. American Society for Testing and Materials. (2004). ASTM C 40 - 04. Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete. Philadelphia: ASTM.
20. American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM C 469 - 10. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. Philadelphia: ASTM.
21. American Society for Testing and Materials. (2011). ASTM C 496 - 11. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia: ASTM.
22. American Society for Testing and Materials. (2004). ASTM C 566 - 04. Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. Philadelphia: ASTM.
23. American Society for Testing and Materials. (2006). ASTM C 642 - 06. Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete. Quito: ASTM.
24. American Society for Testing and Materials. (2009). ASTM C 78 - 09. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia: ASTM.
25. American Society for Testing and Materials. (2008). ASTM D 2845 - 08. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. Philadelphia: ASTM.

26. American Society for Testing and Materials. (2009). ASTM D 75-09. Standard Practice for Sampling Aggregates. (Primera ed.). Philadelphia: ASTM.
27. American Society for Testing and Materials. (2000). ASTM E 119 - 00. Fire Tests of Building Construction and Materials. Philadelphia: ASTM.
28. American Society for Testing and Materials. (1970). ASTM E11-70. Standard Specification for Wire-cloth sieves for testing purposes. Philadelphia: ASTM.
29. American Society for Testing of Materials. (2009). ASTM A 615-09. Standard Specification for Deformed and Plain Billet-Steel Bar for Concrete Reinforcement. Philadelphia: ASTM.
30. Cañizares, F., & Moreno, R. (2011). Agregado alternativo para fabricación de bloques y adoquines en base a polítilen tereftalato. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
31. Comité ACI 211. (1991). Proporcionamiento de Mezclas, Concreto normal, pesado y masivo. American Concrete Institute.
32. Comité ACI 318. (2005). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. American Concrete Institute.
33. Comité ACI 318. (2008). Requisitos del reglamento para concreto estructural. Estados Unidos: American Concrete Institute.
34. Concreto, I. E. (2007). El Manual de Pepe Hormigón. Quito: INECYC.
35. Empresa Metropolitana de Aseo. (2010). Plan de servicios de aseo - Administración Zonal La Delicia. Quito: EMASEO.
36. Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. (2012). Calidad del Agua. Análisis mensual. Obtenido de http://www.emaapq.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=233

37. Fundación para la Investigación y el Desarrollo Ambiental. (s.f.). Reciclaje por materiales. Tereftalato de polietileno. Obtenido de <http://www.fida.es:8001/fida/VisNot?id=7df051f76b411a4a92b25585c374fc>
38. Gaggino, R. (2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la construcción. Revista INVI , 23 (063), 137-163.
39. González Cuevas, Ó., & Fernández Villegas , F. (2005). Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado. México: Limusa.
40. González Cuevas, Ó., & Robles Fernández-Villegas, F. (2005). Aspectos fundamentales del concreto reforzado. México: Limusa.
41. Gutiérrez, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
42. HOY. (04 de Marzo de 2010). HOY. Botellas viejas se convierten en polvo. Obtenido de <http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/botellas-viejas-se-convierten-en-polvo-395735.html>
43. Institución Española del Hormigón Estructural. (1998). Instrucción de Hormigón Estructural. Madrid: EHE. Real Decreto 2661-1998.
44. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 102. Varrillas corrugadas de acero al carbono laminadas en caliente para hormigón armado. Requisitos. (Primera ed.). Quito: INEN.
45. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1986). NTE INEN 154. Tamices de ensayo. Dimensiones nominales de las aberturas. (Primera ed.). Quito: INEN.
46. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 155. Cemento Hidráulico. Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica. Quito: INEN.
47. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 156. Cemento hidráulico. Determinación de la densidad. Quito: INEN.

48. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 157. Cemento hidráulico. Determinación de la consistencia normal. Método de Vicat. Quito: INEN.
49. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 1573. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. Quito: INEN.
50. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 1576. Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo. (Primera ed.). Quito: INEN.
51. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 1578. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento. (Primera ed.). Quito: INEN.
52. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). NTE INEN 158. Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat. (Primera ed.). Quito: INEN.
53. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 2254. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una viga simple con carga en los tercios). Quito: INEN.
54. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 2380. Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.
55. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 695. Áridos. Muestreo. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.
56. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 696. Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.

57. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 855. Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.
58. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 856. Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.
59. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 857. Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.
60. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). NTE INEN 858. Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.
61. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 860. Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.
62. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 862. Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.
63. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). NTE INEN 872. Áridos para hormigón. Requisitos. (Primera ed.). Quito, Ecuador: INEN.
64. Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Hormigón. (2009). Control de calidad en el Hormigón. Notas Técnicas .
65. Jiménez Montoya, P., García Mesenguer, Á., & Morán Cabré, F. (2001). Hormigón Armado. Barcelona, España: Gustavo Gili S.A.
66. Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. México: Portland Cement Association.

67. Llorens, J. (25 de Enero de 2008). Universidad Politécnica de Valencia. Polimedia. Obtenido de Clasificación de los polímeros: <https://polimedia.upv.es/visor/?id=ac48788e-890e-2b41-b8be-3c6f3f944811>
68. Monroy, C., & Luna, G. (1985). Cementos y hormigones. Instructivo de Laboratorio. Quito, Ecuador.
69. Nagle, T. T., & Redd K. Holden. (2002). Estrategia y Tácticas de Precios. Barcelona: Prentice Hall.
70. Nawy, E. (1988). Concreto Reforzado. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
71. NOVACERO. (s.f.). NOVACERO - VARILLA DE CONSTRUCCIÓN. Obtenido de <http://www.novacero.com/client/product.php?p=7&topm=-1>
72. Ortega García, J. (1988). Concreto Armado I. Piura, Perú: Impresiones Diversa Molina.
73. Parker, H., & Ambrose, J. (2008). Diseño simplificado de concreto reforzado. México: Limusa.
74. Pietrobelli, E. R. (2010). Estudo de viabilidade do pet reciclado em concreto sob aspecto da resistência a compressão. Chapecó: Universidade Comunitária da Região de Chapecó.
75. Porrou, P. (1983). Los climas del Ecuador - Fundamentos explicativos. Quito: ORSTOM-PRONAREG.
76. Portland Cement Association. (2004). Diseño y Control de Mezclas. México: PCA.
77. Pozzo iAzzaro, O. (1980). Manual de cálculo de estructuras de hormigón armado. Buenos Aires: Instituto del Cemento Portland Argentino.
78. Rochel, R. (2008). Hormigón Reforzado (Primera ed.). Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.

79. Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R. (2000). Preparacion y Evaluación de Proyectos. Santiago de Chile: McGraw-Hill.
80. The Society of the Plastics Industry. (s.f.). SPI. The plastic industry trade association. Obtenido de <http://www.plasticsindustry.org/>
81. Universidad La Salle, Escuela Mexicana de Arquitectura. Materiales y procedimientos de Construcción. México.
82. Zabaleta, H. (1988). Compendio de Tecnología de Hormigón. Santiago de Chile.